

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 MECÁNICA DE FRACTURA

2.1.1 INTRODUCCIÓN

La fractura es la separación de un sólido en dos o más trozos como respuesta a cargas que pueden ser estáticas o variables y a temperaturas que son bajas en relación a la temperatura de fusión del material. Las cargas aplicadas pueden ser de tracción, compresión, de corte o torsionales. En general, las típicas clases de fractura son: dúctil, frágil, por fatiga, por Creep y debido al medio ambiente.

El inicio de la fractura se da por la aparición de una grieta en la superficie de cualquier elemento mecánico.

La fractura dúctil ocurre después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta. La presencia de deformación plástica da aviso que la fractura será inminente permitiendo que se tomen medidas preventivas. Los materiales dúctiles son más tenaces ya que se requiere mayor energía para inducir la fractura.

La fractura frágil se produce a lo largo de planos cristalográficos llamados planos de fractura y tiene una rápida propagación de la grieta sin ninguna advertencia.

2.1.2 ESTADO DE ESFUERZOS EN UNA GRIETA

El trabajo realizado por las cargas sobre un elemento mecánico es almacenado en forma de energía de deformación elástica, al menos que existan formas de disipación de energía como: calor, vibraciones, cinética, etc.

En presencia de una grieta la energía de deformación produce el crecimiento de la misma, ya que se disipa por sus alrededores como se muestra en la Figura 2.1.

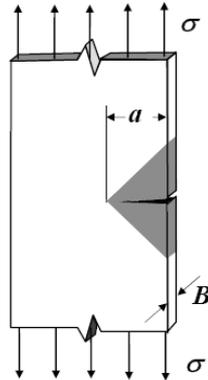


Figura 2.1 Criterio de Griffith para la propagación de grietas.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

A medida que la grieta crece, el material en las zonas sombreadas se ablanda y disipa su energía de deformación.

Si en un elemento de máquina existe una grieta transversal aguda de longitud $2a$, cuya ubicación es en el centro a lo largo y ancho del mismo; si es sometido a un esfuerzo medio axial de tracción σ en ambos extremos de la placa. El análisis elástico muestra que para que se desarrolle la grieta depende del factor K de intensidad de esfuerzo elástico ya que su longitud $2h$ es grande en comparación con su ancho $2w$. Como se muestra en la Figura 2.2.

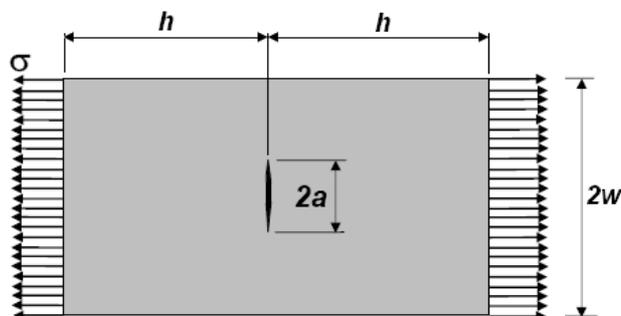


Figura 2.2 Placa de longitud $2h$ y ancho $2b$, con una grieta de extensión $2a$ y un esfuerzo de tensión que actúa en la dirección longitudinal.

Que para este caso:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.1)$$

Donde σ es el esfuerzo nominal en ausencia de grieta y esta ecuación será exacta dentro de un 10% si $a/w \leq 0.4$ y expresada en las unidades siguientes $[MPa \cdot \sqrt{m}]$

Los mayores esfuerzos que soporta una pieza se presentan en la superficie es por esto que las grietas suelen presentarse en las superficies de los sólidos. En el caso de una grieta en el borde de un sólido se tiene el siguiente valor de K_I .

$$K_I = 1.12 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.2)$$

En consecuencia K_I es función del esfuerzo medio y de la configuración geométrica de la pieza, para lo cual se han obtenido soluciones con una amplia gama de valores de las relaciones h/w y a/w , lo cual se muestra en la Figura 2.3.

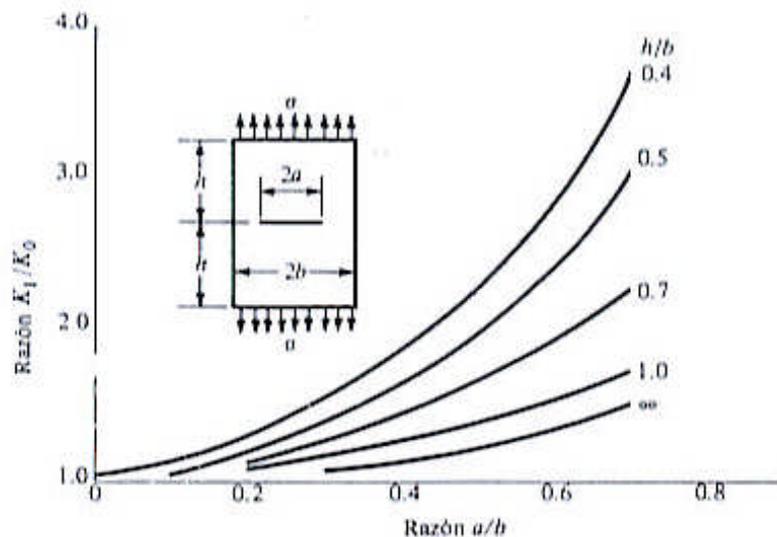


Figura 2.3 Placa con una grieta transversal central sometida a carga de tracción longitudinal.

Fuente: DISEÑO EN INGENIERIA MECÁNICA, Shiley & Mischke.

Donde K_I es el valor deseado y K es el valor base.

2.1.3 CONDICIONES DE FRACTURA

Existen tres condiciones de fractura, las cuales se designan como Modo I, II y III, como se muestra en la Figura 2.4; son las posibles formas de separar o partir en dos una placa transversalmente agrietada en su borde, donde los modos II y III son fundamentalmente de ruptura por cortante pero en el modo II los esfuerzos y la deformación permanecen en el plano de la pieza, mientras III corresponde a un efecto fuera del plano.

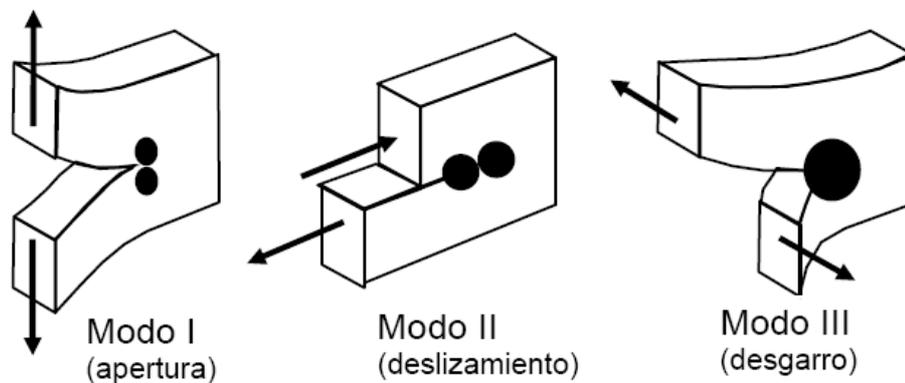


Figura 2.4 Modos de fractura.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Se observa que los modos de fractura son la representación de esquemas de cargas que no pueden transmitirse a través del plano de la grieta, lo que ocasiona una concentración de esfuerzos en su punta. El problema más general puede presentarse como la combinación de los tres modos.

Para la presente investigación se ha fijado el estudio en el modo I, donde el factor de intensidad K se convierte en K_I y el factor crítico de intensidad de esfuerzo K_C en K_{IC} .

En la práctica del diseño la extensión y localización de la grieta constituye en la peor combinación lo cual conduce a un alto grado de debilidad en una estructura, por lo que en años recientes se ha recopilado algunos factores que incrementan la intensidad de esfuerzos.

2.1.4 FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO

Las cargas externas y desplazamientos a los que se encuentra sometido un elemento mecánico son transmitidos a la superficie de la grieta únicamente como cargas distribuidas a lo cual se denomina como principio de superposición.

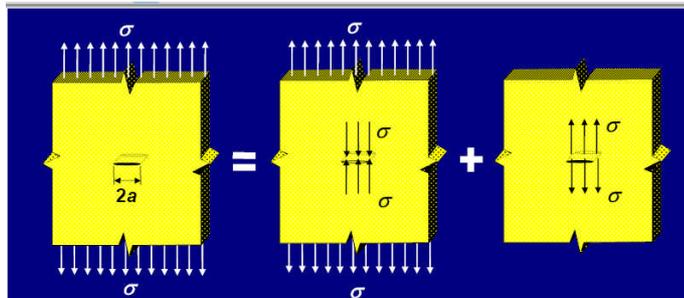


Figura 2.5 Principio de superposición de cargas en grietas

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Existen varias configuraciones de la disposición de grietas sobre los elementos mecánicos, las cuales son:

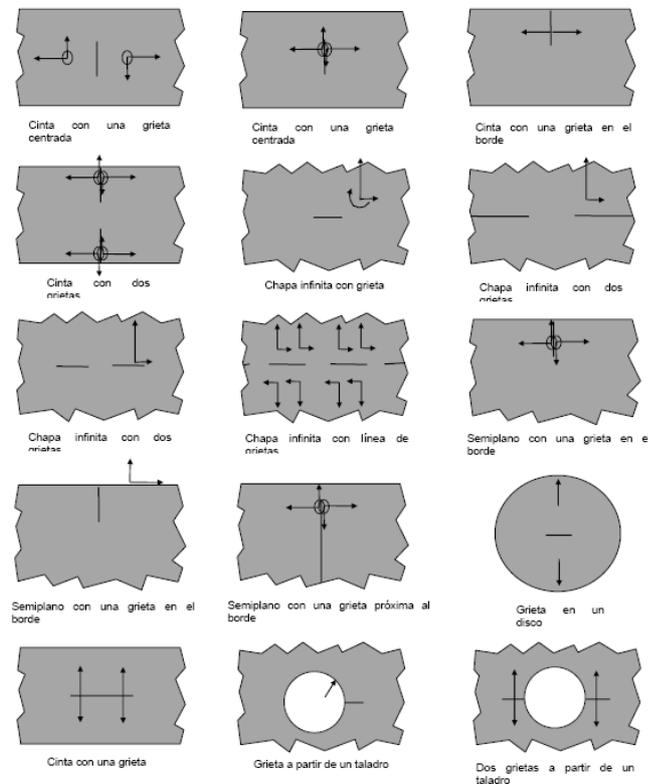


Figura 2.6 Funciones bidimensionales para las que se conoce la función de Green

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

En la Figura 2.7 se representa dos cargas opuestas P a una distancia x medida desde el centro de la grieta de tamaño $2a$, los factores de intensidad de esfuerzos serán distintos si estas cargas no están centradas en ambos extremos de la grieta, en los extremos A y B estos factores de intensidad también son diferentes conforme a los modos de fractura,

$$K_{IA} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}}, \quad K_{IIA} = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}}, \quad K_{IIIA} = \frac{R}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} \quad (2.3)$$

$$K_{IB} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a-x}{a+x}}, \quad K_{IIB} = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a-x}{a+x}}, \quad K_{IIIB} = \frac{R}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a-x}{a+x}}$$

Por lo tanto, si las cargas se encuentran cerca del extremo A, mayor será el factor de intensidad de esfuerzos; $x \rightarrow a, K_A \rightarrow \infty$.

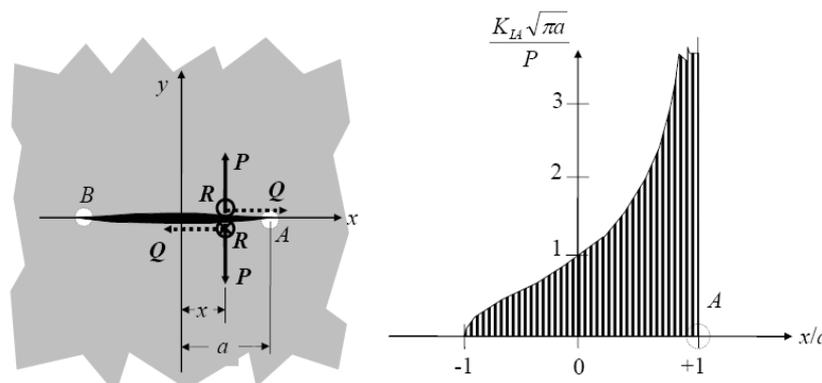


Figura 2.7 Función de Green para la geometría de Griffith.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Si es el caso de una carga distribuida sobre la superficie de la grieta $\sigma(x)$, el factor de intensidad de esfuerzos se calcula integrando sobre toda la longitud, como en la ecuación 2.4,

$$K_{IA} = \int_{-a}^a \frac{\sigma(x) \cdot dx}{\sqrt{\pi \cdot a}} \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot a}} \int_{-a}^a \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \cdot \sigma(x) \cdot dx = \int_{-a}^a g\left(\frac{x}{a}\right) \cdot \sigma(x) \cdot dx \quad (2.4)$$

A la función g se le llama función de influencia o función de Green para esa geometría, que depende de la ponderación de cargas y de su posición relativa a la punta de la grieta.

Por lo tanto, si se tiene cargas uniformemente distribuidas se obtendrá un resultado de la integración similar a la ecuación 2.1

Si el ancho de la grieta a , no es pequeño comparado con el ancho de la placa w y/o si la geometría del elemento es más complicada que una simple placa agrietada como en la Figura 2.3; el cálculo de K_I es distintivo de la geometría de la pieza, del tipo de carga y de la razón a/w .

Se dispone de curvas de la función de Green para las siguientes configuraciones:

- Placa con una grieta centrada y carga uniformemente distribuida

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \sqrt{\sec \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot W}} \quad (2.5)$$

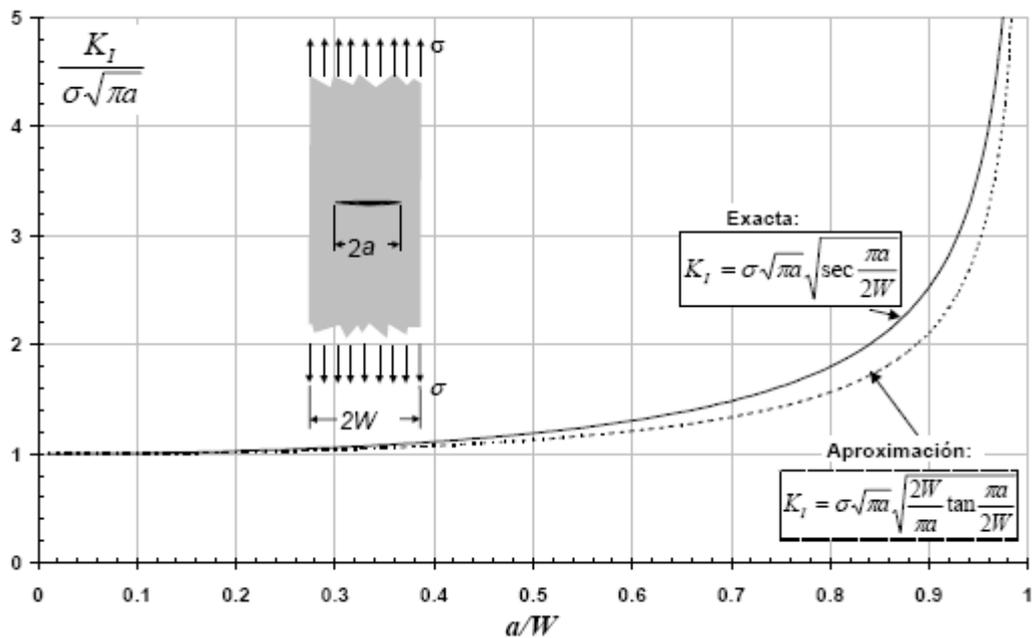


Figura 2.8 Placa con grieta centrada y ancho finito.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

- Grieta en el borde de un elemento semi-finito y tracción uniforme

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \sqrt{\sec \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot W}} \quad (2.6)$$

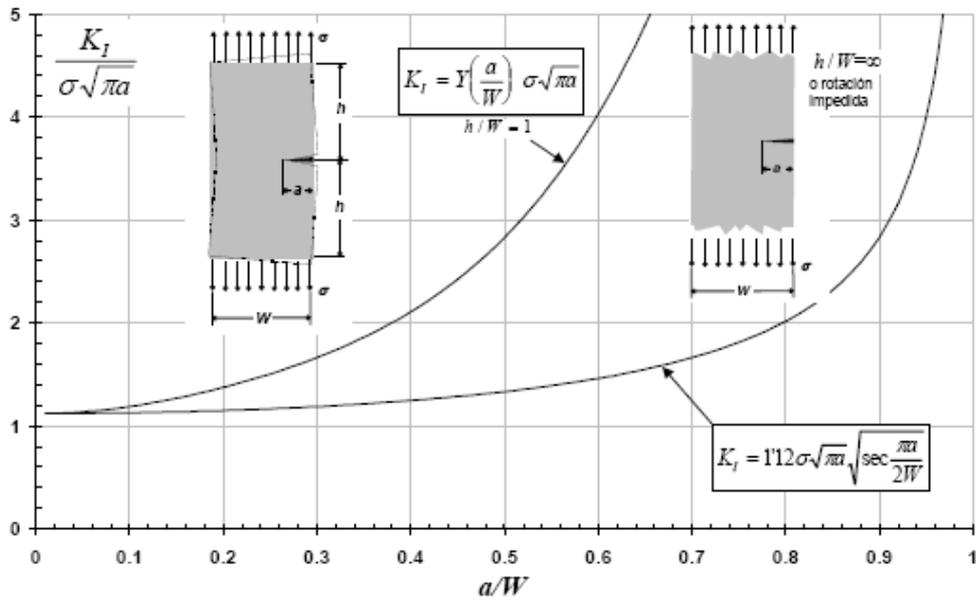


Figura 2.9 Placa con grieta en el borde y anchura finita.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

En el caso de que el contorno de la placa sea de tal modo que $h/W = 1$ la

función $Y\left(\frac{a}{W}\right)$, se calculó de la siguiente manera:

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = 1.12 - 0.23 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 10.55 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.71 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.38 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (2.7)$$

- Placa con grieta en el borde sometida a flexión

$$K_I = \frac{6 \cdot M \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{W^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot W}{\pi \cdot a} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot W}\right)} \cdot \frac{0.923 + 0.199 \cdot \left(1 - \operatorname{sen}\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot W}\right)\right)^4}{\cos\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot W}\right)} \quad (2.8)$$

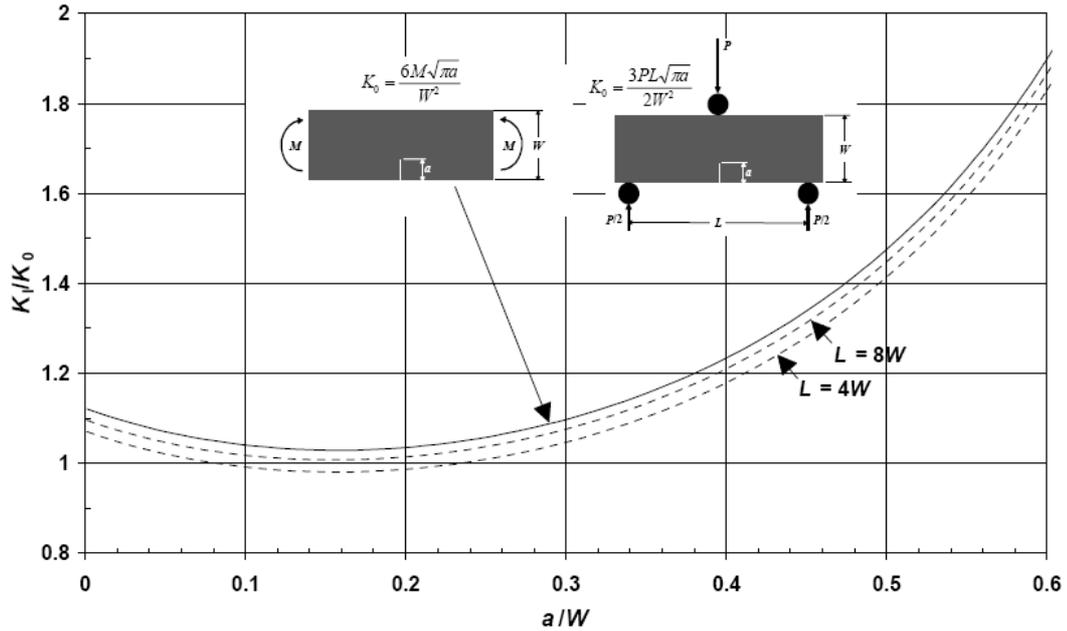


Figura 2.10 Placa con grieta en el borde sometida a flexión.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Para la placa sometida a flexión en tres puntos la ecuación es:

$$K_I = \frac{3PL\sqrt{\pi a}}{2W^2} \cdot \frac{A - \frac{a}{W} \cdot B + \left(\frac{a}{W}\right)^2 \cdot C - \left(\frac{a}{W}\right)^3 \cdot D + \left(\frac{a}{W}\right)^4 \cdot E}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2} \left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\sqrt{\pi}} \quad (2.9)$$

$$A\left(\frac{W}{L}\right) = 1.989 - 0.356\frac{W}{L}, B\left(\frac{W}{L}\right) = 1.217 + 0.315\frac{W}{L}, C\left(\frac{W}{L}\right) = 3.212 + 0.705\frac{W}{L}$$

$$D\left(\frac{W}{L}\right) = 3.222 + 0.02\frac{W}{L}, E\left(\frac{W}{L}\right) = 1.226 - 0.015\frac{W}{L}$$

- Grieta partiendo de un agujero

$$K_I = 1.12 \cdot 3\sigma\sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.10)$$

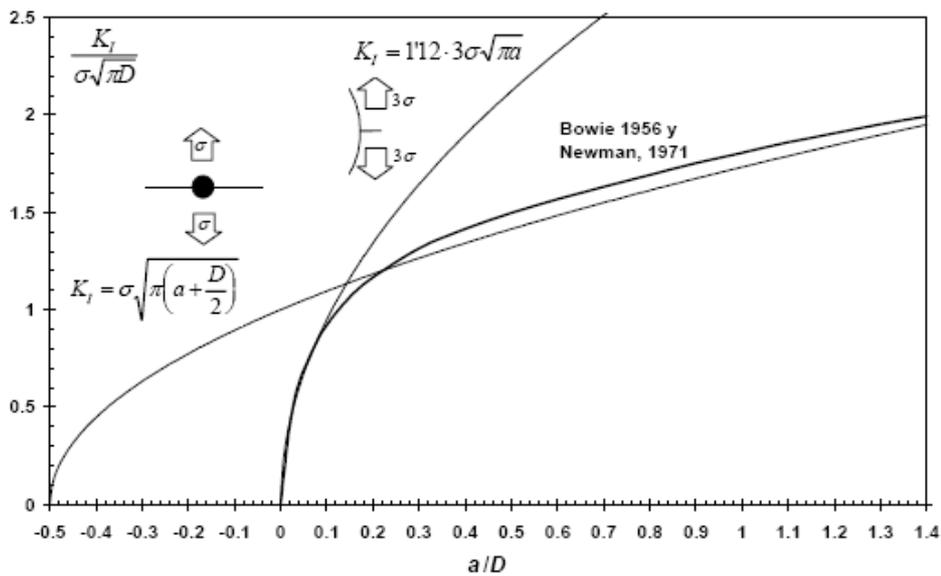


Figura 2.11 Grieta a partir de un agujero.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

2.1.5 TENACIDAD A LA FRACTURA

La tenacidad a la fractura representada por K_{IC} para el modo I de fractura y es un valor crítico de la intensidad de esfuerzo a la fractura que puede soportar un material, por lo tanto es una propiedad del material que se la obtiene luego de ensayar probetas estandarizadas por ASTM.

Cuando el valor de K_I alcanza el valor crítico de K_{IC} por el incremento de esfuerzo nominal o por crecimiento de la grieta, ésta se propagará rápidamente hasta la rotura. Por lo tanto se ha designado un factor de seguridad para la falla de la mecánica de fractura definido como:

$$N_{FM} = \frac{K_{IC}}{K_I} \tag{2.11}$$

La tenacidad a la fractura K_{IC} para metales de ingeniería tiene una gama desde 20 hasta 200 $[MPa \cdot \sqrt{m}]$ y en polímeros y cerámicos desde 1 hasta 5 $[MPa \cdot \sqrt{m}]$.

Esta propiedad es paralela a la ductilidad y se aumenta en mucho a altas temperaturas.

2.1.6 TIPOS DE FRATURA

2.1.6.1 Fractura Frágil

Los materiales que tienen una estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado (BCC) y hexagonal poseen la particularidad de ser propensos a la fractura frágil, aunque son suficientemente dúctiles en la temperatura ambiente. Estos materiales se vuelven frágiles a bajas temperaturas. La superficie de fractura frágil está caracterizada por dos tipos de marcas llamadas “V-Shaed chevron” y “River Patterns”. La dirección con la que se propaga la grieta es aproximadamente perpendicular a la dirección de los esfuerzos aplicados originando una superficie de fractura aproximadamente plana.

En la mayor parte de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta se da por sucesivas y repetidas roturas de los enlaces atómicos a lo largo de los planos cristalinos específicos, dicho fenómeno es conocido como **clivaje**. Debido a que las fisuras atraviesan los granos se dice que este tipo de fractura es transgranular.

Pero en algunas aleaciones la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano, por lo que a este tipo de fractura se la denomina intergranular, dicha fractura se produce normalmente posterior a algún proceso que debilita o fragiliza la región del borde de grano.



a) Transgranular

b) Intergranular

Figura 2.12 Fractografías de barrido electrónico mostrando una superficie de fractura transgranular e intergranular.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Gran cantidad de fallas en estructuras soldadas como barcos, puentes, recipientes a presión y tuberías; han ocurrido debido a la fractura frágil. Las principales causas para la fractura frágil son:

- La existencia de un concentrador de esfuerzos
- La existencia de esfuerzos de tracción
- Falta de tenacidad de la entalla (baja temperatura), las entallas pueden ser defectos de soldaduras como fisuras, falta de penetración, solapes, etc.

Transición Dúctil – Frágil

Un acero con bajo porcentaje de carbono tiene fractura dúctil alrededor de la temperatura ambiente y se vuelve fractura frágil a menores temperaturas. Esto explica porqué la superficie en fractura dúctil aparece fibrosa mientras que si es frágil la textura es granular. Entre la transición dúctil – frágil existen los dos tipos de características.

Por ejemplo al realizar un ensayo de impacto (CHARPY), en probetas similares a diferentes temperaturas, estas tendrán un comportamiento similar al mostrado en la Figura 2.13.

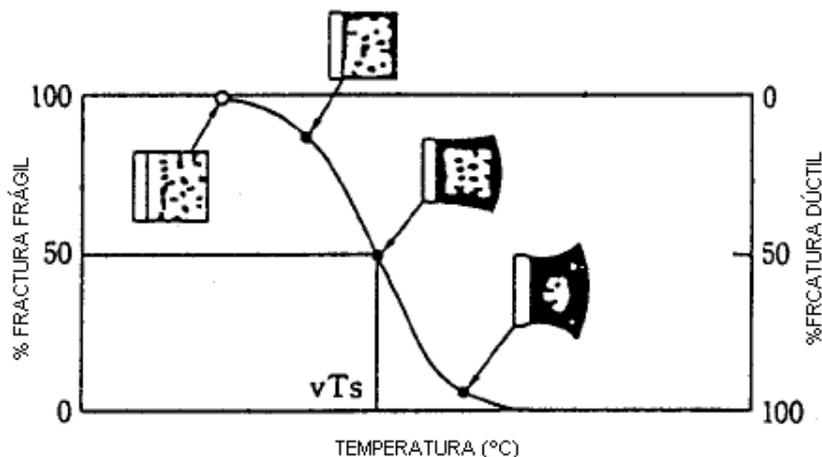


Figura 2.13 Dependencia de la temperatura del porcentaje de fractura.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

En consecuencia en los aceros a medida que aumenta la temperatura su tenacidad a la fractura también aumenta, mientras que al disminuir la temperatura su tenacidad también disminuye como se puede observar en la Figura 2.14.

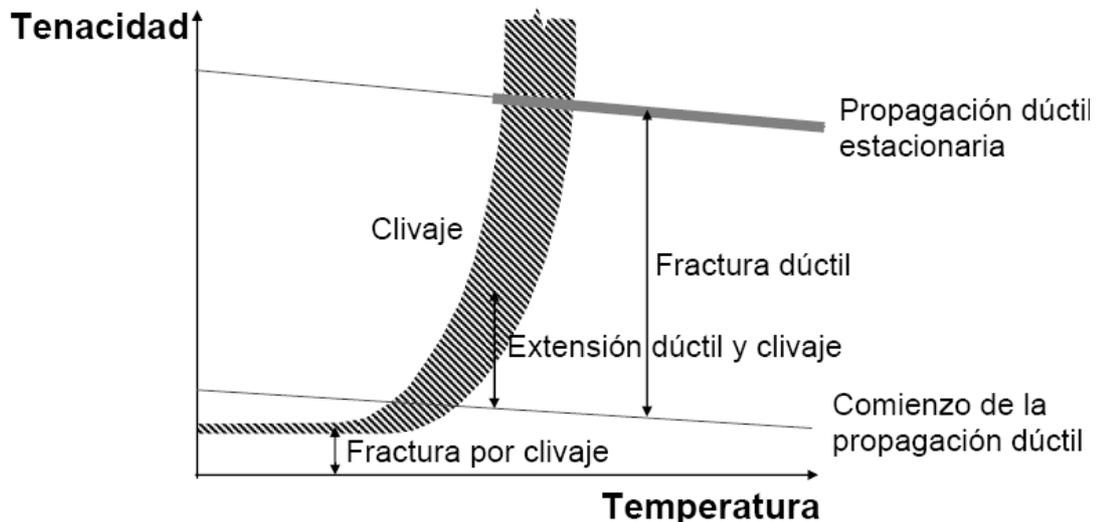


Figura 2.14 Esquema de la transición dúctil – frágil.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Para muchas aleaciones existe un rango de temperaturas en las que se produce la transición dúctil – frágil, lo cual dificulta la especificación de una temperatura de transición.

No todas las aleaciones muestran una transición dúctil – frágil pues existen materiales con estructuras cúbicas de caras centradas (Fcc) como las aleaciones de aluminio y cobre, las cuales permanecen dúctiles a bajas temperaturas.

La composición química del acero tiene una influencia definida sobre la temperatura de transición. En los aceros comunes, un incremento del contenido de carbono elevará apreciablemente dicha temperatura. El manganeso es el elemento de aleación que más ayuda a bajar esa temperatura en el acero estructural. Luego, estos aceros tendrán un relativo bajo contenido de carbono con un relativo alto contenido de manganeso.

Prevención de la fractura frágil

Se puede prevenir la fractura frágil eliminando al menos una de las tres principales causas antes mencionadas.

La reducción de discontinuidades geométricas, fisuras y defectos de soldadura; puede ser un primer paso. Posteriormente se debe aliviar tensiones como un medio efectivo para la prevención de la fractura frágil ya que tensiones residuales debido a la soldadura incrementa la temperatura de transición.

Algunos factores que afectan la fractura frágil son: material, espesores, tipo de estructura, condiciones de tensiones, temperatura de trabajo.

2.1.6.2 Fractura Dúctil

La fractura dúctil en aceros es iniciada dentro de la zona de estrangulamiento formándose un cuello y cavidades dentro de la misma, posteriormente estas cavidades se fusionan formando una grieta en el centro de la muestra y propagándose hacia la superficie en la dirección perpendicular al esfuerzo aplicado.

Cuando se acerca a la superficie la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje del esfuerzo, dando como resultado una fractura de cono y embudo. Todo esto ocurre bajo una intensa deformación plástica.

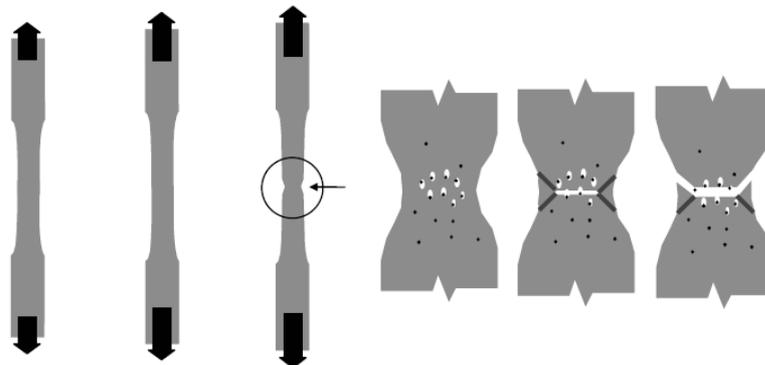


Figura 2.15 Esquema de fractura a tracción de un material dúctil por fusión de cavidades.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

2.1.6.3 Fractura por Fatiga

Características Generales

Una forma de fractura es la fatiga, la cual se produce al someter a estructuras y elementos de máquinas a esfuerzos dinámicos y fluctuantes. La cual se puede producir bajo estas circunstancias a niveles bajos de esfuerzo.

Debido a que la fractura se produce generalmente después de un período de esfuerzos repetitivos o cíclicos, se determina que la falla se produjo por fatiga. Este tipo de fractura es catastrófica y ocurre rápidamente sin aviso; se considera que el 90% de las fracturas metálicas se producen debido a la fatiga.

Su naturaleza es semejante a la fractura frágil aún en metales normalmente dúctiles, en los cuales hay muy poca o ninguna deformación plástica asociada a la fractura. La fractura por fatiga se presenta en dos etapas la iniciación y la propagación de fisuras, cuya superficie es perpendicular a la dirección de los esfuerzos de tracción aplicados.

Las curvas de Whoeler (S – N) representan una de las principales características de la fatiga, las cuales relacionan la amplitud de los esfuerzos cíclicos y el número de ciclos para su rotura.

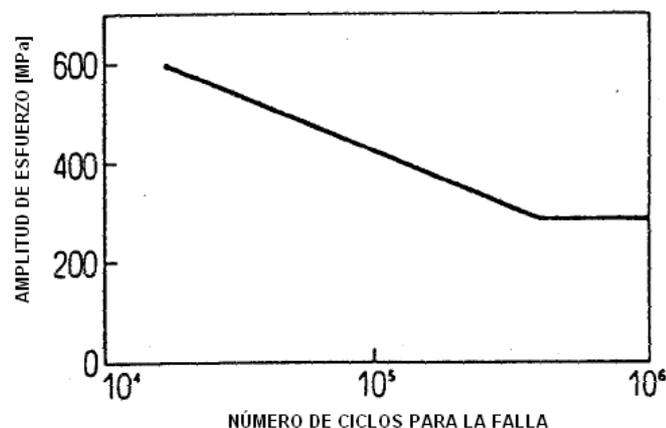


Figura 2.16 Curva S – N para aceros.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Esfuerzos cíclicos

Existen tres tipos de esfuerzos que pueden ser aplicados: axiales (tracción – compresión), flexionales (flexión) y torsionales. Los modos de fluctuaciones esfuerzo – tiempo pueden de las tres formas que se indican en la Figura 2.17 y son: a) Esfuerzo de inversión total, cuya amplitud es simétrica a un nivel de esfuerzos promedio y alternando desde un esfuerzo máximo de tracción ($\sigma_{m\acute{a}x}$) a un esfuerzo de compresión ($\sigma_{m\acute{i}n}$) de igual magnitud; b) Ciclo de esfuerzos repetitivos, donde el máximo y el mínimo son asimétricos relativo al nivel de esfuerzos 0; y c) Ciclos de esfuerzos al azar, donde puede variar la amplitud y frecuencia.

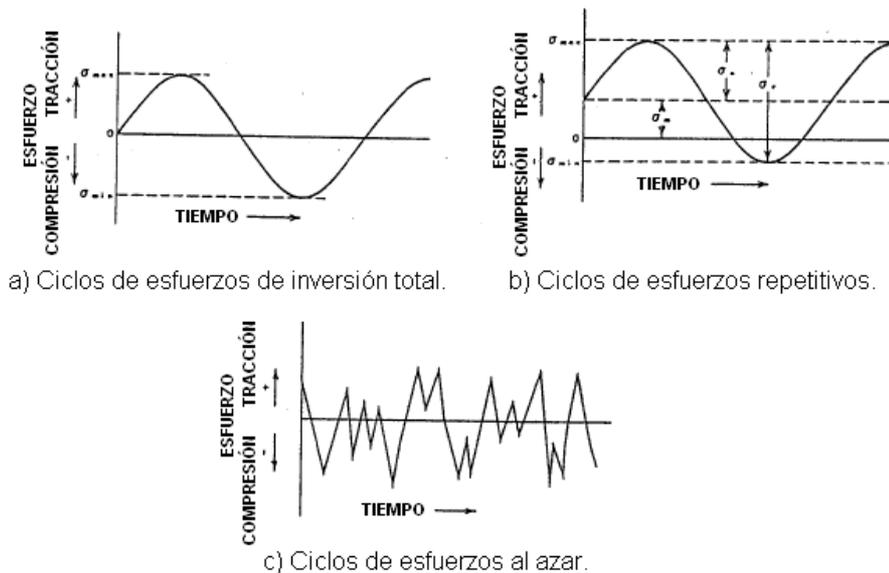


Figura 2.17 Tipos de ciclos de tensiones por fatiga.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

El esfuerzo medio está definido como el promedio de los esfuerzos máximos y mínimos de un ciclo, y es expresado con la ecuación:

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (2.12)$$

Además el rango de esfuerzos σ_r es la diferencia entre $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $\sigma_{m\acute{i}n}$ dado por la ecuación:

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.13)$$

La amplitud del esfuerzo σ_a es la mitad del rango de esfuerzos dado por la ecuación:

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (2.14)$$

Finalmente la relación entre los esfuerzos R es la relación entre la amplitud de los esfuerzos mínimo y máximo, dado por:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2.15)$$

Curva S – N o curva de Whoeler

Por medio de una simulación en el laboratorio se puede determinar las curvas de Whoeler de algunos materiales. Donde se indican las magnitudes de esfuerzos más altos y el menor número de ciclos que el material puede soportar antes de su fractura.

Para algunas aleaciones ferrosas y de titanio la curva de Whoeler se hace horizontal para valores altos de ciclos N o hay un límite de nivel de esfuerzos, llamado *límite de fatiga*, debajo del cual la fractura por fatiga no ocurre. Dicho límite representa el mayor valor de tensiones fluctuantes que no causará fractura para teóricamente un número infinito de ciclos. Para muchos aceros los límites de fatiga se encuentran entre 35 y 60% de los esfuerzos de tracción.

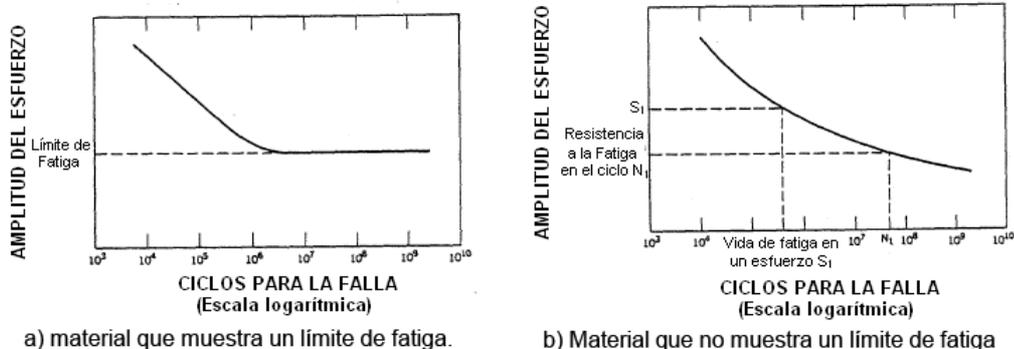


Figura 2.18 Tipos de curvas S – N

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Las curvas de Whoeler para la mayoría de aleaciones no ferrosas como aluminio, cobre, magnesio; tienen una tendencia descendente para grandes valores de N como se muestra en la Figura 2.18b. Esto quiere decir que no presentan un límite de fatiga, en este caso se producirá indudablemente la fractura por fatiga sin considerar la magnitud de los esfuerzos; por lo cual se especifica un esfuerzo de fatiga que producirá fractura en algún determinado número de ciclos.

La vida a la fatiga N_f es otro de los parámetros importantes que caracteriza el comportamiento de la fatiga; y está definido como el número de ciclos que causarán fractura a un nivel especificado de esfuerzos, como se indica en la Figura 2.18b.

Como se indica en la Figura 2.18 el comportamiento de la fatiga se puede clasificar dentro de dos dominios; uno asociado con cargas relativamente altas que producen deformación elástica y deformación plástica durante cada ciclo, en consecuencia las vidas a la fatiga son relativamente cortas y a este dominio se lo llama fatiga de bajos ciclos y se produce a valores menores que 10^4 y 10^5 ciclos.

El segundo dominio es conocido como fatiga de altos ciclos, está asociado con vida a la fatiga mayor a 10^4 y 10^5 ciclos, por lo tanto la vida a la fatiga es más prolongada ya que sufre solamente deformación totalmente elástica bajo esfuerzos menores.

Iniciación y propagación de la grieta

Si en un componente sometido a fatiga se está desarrollando una grieta, dicho desarrollo tiene tres etapas típicas: iniciación, propagación estable y finalmente la propagación violenta hasta el fallo del componente.

ESTADO I Iniciación: en los lugares con alta concentración de esfuerzos se producen deformaciones plásticas en los granos próximos a la superficie, esta deformación se localiza en las bandas persistentes de deslizamiento como se

muestra en la Figura 2.19a. Cuando esto ocurre se genera un escalón en la superficie el cual se oxida inmediatamente y resulta imposible invertir la deformación en ese plano, por lo cual la deformación en sentido contrario deberá acontecer en otro plano que obviamente forma otro escalón que se oxida y se suprime la deformación en este nuevo plano. La repetición sucesiva de deformación, oxidación y bloqueo da como resultado protuberancias o entrantes en la superficie original del sólido. Esta situación se agrava y termina por aparecer una grieta a partir de estos defectos superficiales formando 45° con la dirección de la tracción. En los metales policristalinos en esta etapa, la grieta tiene mucha dificultad para atravesar los bordes de grano y generalmente consigue progresar en un grano y se detiene, si la carga es un poco más alta o con suficiente número de ciclos inicia la propagación en el grano adjunto.

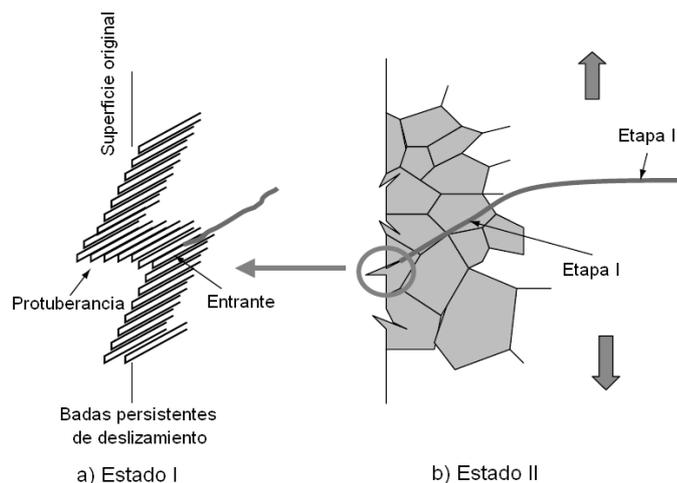


Figura 2.19 Proceso de agrietamiento por fatiga.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

ESTADO II Propagación: una vez que la fisura ha nucleado, se comienza a propagar muy despacio inicialmente, a este proceso se lo llama Etapa I como se muestra en la Figura 2.19b, la cual puede constituir una fracción grande o pequeña del total de la vida a la fatiga dependiendo del nivel de esfuerzos y naturaleza de la pieza en ensayo.

Posteriormente la propagación ingresa a la Etapa II como se muestra en a Figura 2.19b, donde la fisura avanza incrementalmente con cada ciclo de

esfuerzo, en este punto también existe un cambio de dirección de propagación de la grieta siendo generalmente perpendicular a los esfuerzos aplicados.

Durante esta etapa el crecimiento de la fisura se produce por un proceso repetitivo de redondeo y afinado de la punta de la fisura como se muestra en la Figura 2.20.

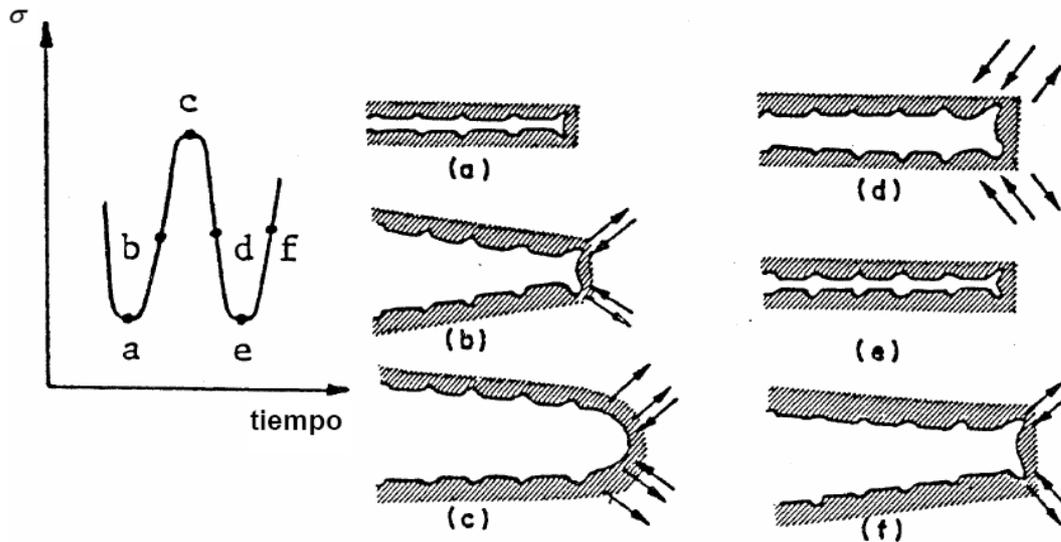


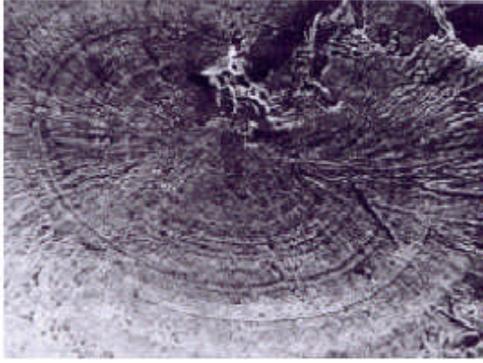
Figura 2.20 Crecimiento de una grieta por enromamiento plástico.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Donde:

- a) Carga 0
- b) Carga de tracción pequeña
- c) Carga de tracción máxima
- d) Carga de compresión pequeña
- e) Carga de compresión máxima
- f) Carga de tracción pequeña

En la Etapa II de propagación se originan marcas sobre la superficie de fractura que pueden ser de dos tipos marcas de playa o estriaciones como se muestra en la Figura 2.21, las dos indican la punta de iniciación de la fisura y aparecen como anillos concéntricos que se expanden a partir del punto o puntos de iniciación frecuentemente dando un patrón circular o semicircular.



a) Playas



b) Estrías

Figura 2.21 Tipos de marcas sobre la superficie de fractura.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

Las marcas de playa son de dimensiones macroscópicas y se pueden observar a simple vista, lo que no ocurre con las estrías que son de característica microscópica y no es posible observarlas a simple vista.

Si la fractura se produce rápidamente no aparecerán marcas de playa ni estrías, además cuando hay evidencias de deformación plástica se tomará como fractura dúctil y en su ausencia como fractura frágil.

Conforme la grieta crece, la dirección en que lo hace no es óptima y su propagación requiere menor trabajo si se orienta en forma perpendicular al campo de tracción. Dicha reorientación ocurre cuando la microgrieta ha atravesado pocos granos en el material y a partir de este momento la propagación es estable y se ajusta a una ley potencial en el factor de intensidad de esfuerzos, de acuerdo a la ley empírica propuesta por *Paris* y *Erdogan*.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m \quad (2.16)$$

Donde a es el tamaño de la grieta, N el número de ciclos, C y m son constantes que dependen del material y del medio ambiente los cuales se encuentran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros de la ecuación de Paris para varios aceros.

ACERO	UNIDADES SI		UNIDADES IPS	
	C	M	C	m
Ferrítico Perlítico	6.90E-12	3.00	3.6E-10	3.00
Martensítico	1.35E-10	2.25	6.6E-09	2.25
Inoxidable Austenítico	5.60E-12	3.25	3.0E-10	3.25

Fuente: Diseño de Máquinas Robert Norton

ESTADO III Fractura final: una vez que el tamaño de la grieta es grande el máximo factor de intensidad de esfuerzos durante el ciclo se aproxima a la resistencia a la fractura del material, y se observa que las pequeñas zonas rotas por clivaje (poppings) son frecuentes y la velocidad de crecimiento se acelera a un más por estas contribuciones frágiles a su propagación, entonces llega el momento que se alcanza el valor de la resistencia a la fractura del material y la propagación se vuelve catastrófica rompiéndose por clivaje o por coalescencia de cavidades. En este último estado la velocidad de crecimiento de la fisura es tan grande que el número de ciclos consumidos apenas cuenta en la vida de la pieza.

Factores que afectan la vida a la fatiga

- Esfuerzos medios

Los esfuerzos medios también afectan la vida a la fatiga y su influencia puede ser representada por una serie de curvas S – N mediadas a diferentes valores de esfuerzos medios que se muestra esquemáticamente en la Figura 2.22.

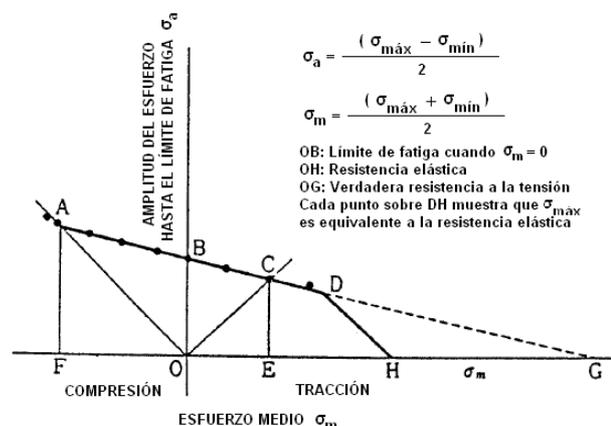


Figura 2.22 Influencia de los esfuerzos medios sobre la fatiga.

Fuente: FRACTURA DE MATERIALES, Ing. Ricardo Echevarria

El incremento del nivel de esfuerzos medios produce un decremento en la vida a la fatiga.

- *Efectos de la superficie*

Para la mayoría de situaciones de carga los esfuerzos máximos en un componente o estructura se producen en la superficie, por lo que las fisuras que llevan a la fractura por fatiga se originan en esta región, de aquí que la vida a la fatiga es especialmente sensible a las condiciones y configuración de la superficie de los componentes.

- *Factores de diseño*

Al diseñar un componente se debe tener en cuenta cualquier entalla o discontinuidad, ya que esto puede actuar como un concentrador de esfuerzos y luego ser el sitio donde se originen las fisuras. Estas características de diseño incluyen ranuras, agujeros, filetes, etc

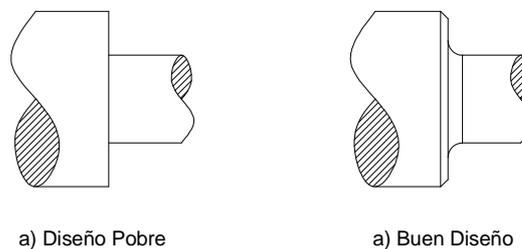


Figura 2.23 Diferencias en las formas de diseño.

- *Tratamientos superficiales*

Al momento de maquinado de una pieza, por acción de las herramientas de corte invariablemente se introducen en la superficie pequeños rayones y entallas, los cuales pueden limitar la vida a la fatiga por lo que se ha considerado mejorar el acabado superficial ya sea por pulido u otros métodos para alcanzar un incremento significativo en la vida a la fatiga; uno de los métodos más efectivos es introducir esfuerzos de compresión residuales en una capa externa de la superficie y así los esfuerzos de tracción superficiales serán parcialmente contrarestados.

El mejoramiento de las propiedades de fatiga proviene del incremento de la dureza de la capa superficial.

Fatiga en grietas largas

Es considerada como larga una grieta cuando su tamaño es equivalente a muchos granos, si se mide la velocidad de propagación en función del rango de esfuerzos aplicados se obtendrá un diagrama similar al de la Figura 2.24. Además se distinguen los tres estados donde en el estado II y el estado III se presentan grietas largas antes explicadas, mientras que en el estado I aunque la grieta es larga tiene velocidades mayores que no corresponden a la ecuación de Paris.

La grieta deja de crecer cuando el rango para el factor de intensidad de esfuerzos es muy pequeño y al valor en el cual la grieta larga no crece se lo denomina *umbral de fatiga* ΔK_{th} (threshold-umbral), el cual depende del material, medio ambiente y la propagación entre la carga máxima y mínima. El umbral de fatiga se debe a un fenómeno conocido como cierre de la grieta.

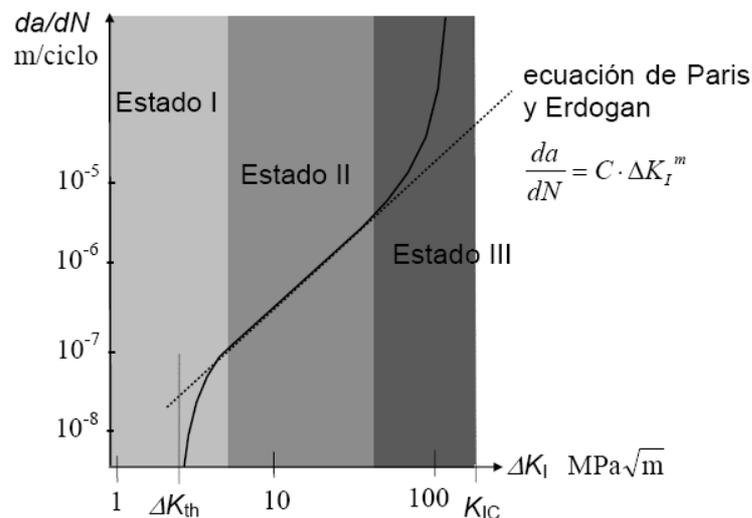


Figura 2.24 Estados de fatiga sobre un diagrama de Paris.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Si dentro de un ciclo las cargas son pequeñas, con la carga máxima la grieta no llega a abrirse, por lo tanto no crece y esto se debe a que existe: formación

de óxidos, rugosidad en las superficies de la grieta y esfuerzos residuales inducidos en la zona plástica al frente de la grieta. Una vez cerrada la grieta se puede transmitir esfuerzos a través de ella, lo cual no sucede en la punta donde $K_I = 0$ y el sólido se comporta como si no tuviera grieta.

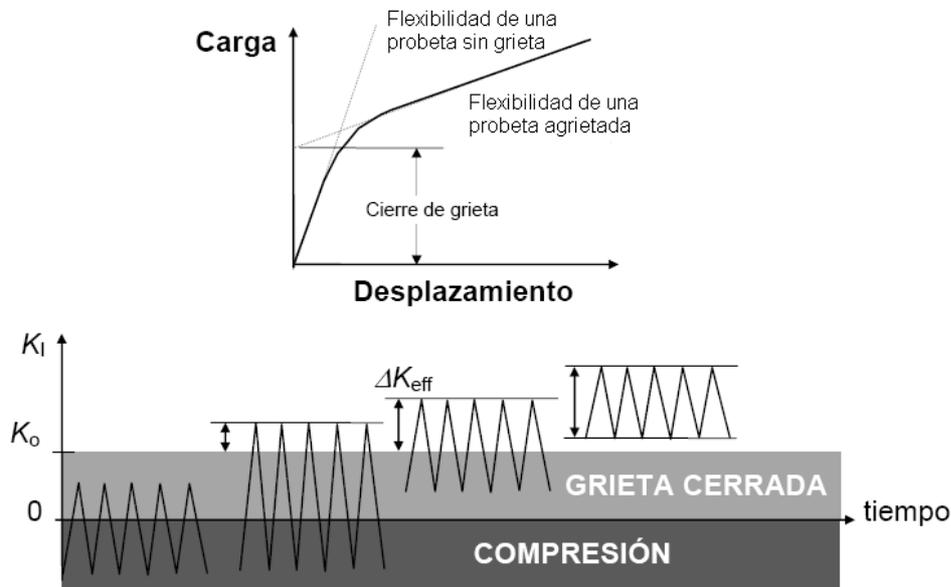


Figura 2.25 Factor de intensidad de tensiones para la apertura de la grieta K_{op} , y definición del rango efectivo de intensidad de esfuerzos ΔK_{eff} .

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Si se tiene una grieta en la cual se han formado óxidos sobre su superficie, la cual no se ha abierto hasta alcanzar un factor de intensidad de esfuerzos K_{op} . Dentro de un ciclo se obtendrá un ΔK_{eff} en función de la posición relativa con respecto a $K_{mín}$ y $K_{máx}$, como se muestra en la Figura 2.25.

En la Figura 2.26 se muestra como el cierre de una grieta justifica velocidades menores a la correspondiente a la ecuación de Paris, la existencia de un umbral de fatiga el cual está en función de la relación de cargas R .

$$R = \frac{K_{mín}}{K_{máx}} \quad (2.17)$$

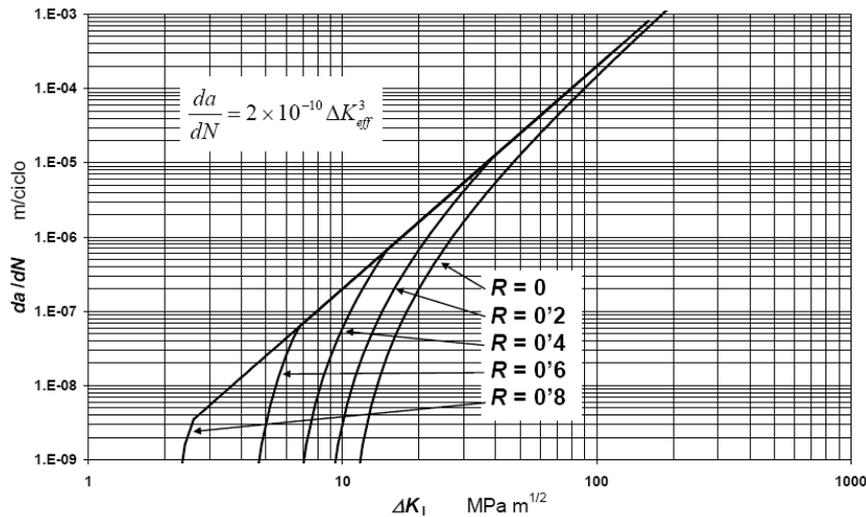


Figura 2.26 Efecto de la relación de cargas, $R = K_{\text{mín}}/K_{\text{máx}}$, sobre la velocidad de crecimiento de grietas suponiendo un $K_{\text{op}} = 10 \text{ MPa m}^{1/2}$

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Fatiga en grietas cortas

Una grieta es corta cuando sus dimensiones son comparables a los tamaños de la microestructura del material. Su comportamiento es atípico sobre todo en la zona del umbral de fatiga donde tienden a crecer de forma errática, es decir crecen deprisa dentro de un grano por debajo del umbral de fatiga y frecuentemente se detienen en las juntas de grano o inclusiones. Este comportamiento se explica en base a dos fenómenos: la rugosidad de la grieta es menor en una grieta que avanza en un solo grano que la que tiene una grieta larga con una topografía mucho más irregular, por lo tanto el cierre de una grieta es pequeña en una grieta corta y aumenta con el tamaño de la grieta hasta saturarse alcanzando el K_{op} de una grieta larga.

El otro fenómeno puede explicarse de la siguiente manera: a medida que la grieta crece en el grano su velocidad de propagación sigue elevada como se muestra en la Figura 2.28a. Al llegar a la junta del grano la grieta debe cambiar su trayectoria para acomodarse a la nueva orientación del grano adyacente como se muestra en la Figura 2.28b.

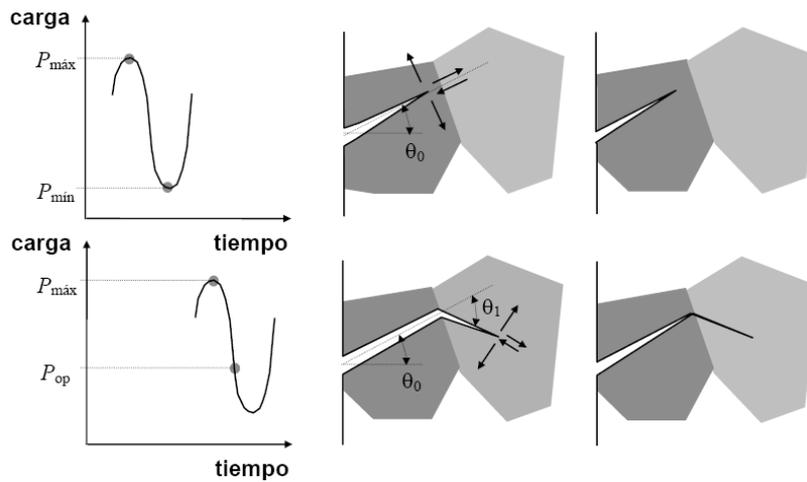


Figura 2.28 Desviación de la trayectoria de una grieta corta la atravesar una junta de grano y consiguiente aparición de un cierre de grieta.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Esta desviación ocasiona una reducción apreciable del valor ΔK_{eff} así como la aparición de un cierre de grieta que se da por la aparición de modos mixtos de carga. Si la orientación de granos continuos es muy semejante, la deceleración que experimenta la grieta es escasa pero contrariamente la caída ΔK_{eff} puede ser lo suficientemente grande como para que se detenga totalmente la microgrieta.

Efecto de las sobrecargas

Cuando un componente es sobrecargado y este no se rompe en el acto, su vida a la fatiga aumenta, lo cual se debe a que en la punta de la grieta se desarrolla una gran bola plástica tal como se muestra en la Figura 2.29. Al momento de descargarlo aparecen compresiones residuales cuya zona plástica es la cuarta parte de la anterior generada por tracción.

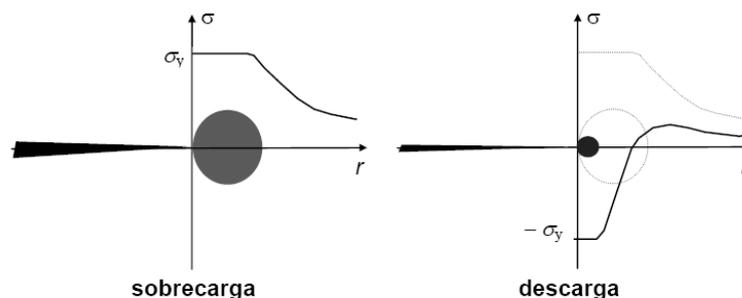


Figura 2.29 Esfuerzos residuales creados por una sobrecarga aislada.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

2.1.6.4 Fractura por Creep

El Creep es la relación entre la deformación permanente y el tiempo que sufren los materiales que están en servicio a elevadas temperaturas y expuestos a esfuerzos mecánicos estáticos, el Creep sucede indeseablemente limitando el tiempo de vida de un pieza, en los metales se vuelve importante a altas temperaturas que están alrededor del 40% de la temperatura de fusión absoluta.

Al aplicar una carga de tracción, existe una deformación instantánea como se muestra en la Figura 2.30, la cual es mayormente elástica como resultado la curva de Creep tiene tres regiones, las cuales tienen sus propias características en la relación esfuerzo – tiempo.

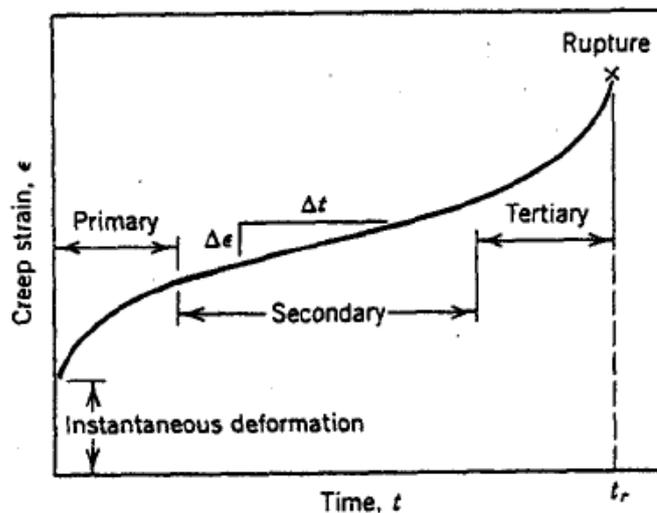


Figura 2.30 Curva de Creep típica a esfuerzo constante y elevada temperatura.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

El Creep primario que está definido como una disminución continua de la velocidad de Creep ya que la pendiente de la curva disminuye con el tiempo, lo cual determina que el material ha experimentado un incremento en la resistencia al Creep o endurecimiento por deformación, haciéndose más difícil que el material se deforme.

El Creep secundario o estacionario, tiene una velocidad constante que corresponde a un gráfico lineal y una etapa de mayor duración.

El Creep terciario sufre una aceleración de la velocidad y finalmente la fractura del material, a lo cual se la llama frecuentemente ruptura y es el resultado de los cambios microestructurales y/o metalúrgicos como separación del borde de grano, formación de fisuras internas, cavidades, etc.

Por otro lado para cargas de compresión uniaxial es preferible materiales frágiles, debido a que proveen mejores mediciones de las propiedades intrínsecas de Creep ya que no hay amplificación de esfuerzos, propagación de fisuras como en las cargas de tracción.

2.1.6.5 Fractura debido al Medio Ambiente

Si un material se encuentra dentro de un ambiente corrosivo, se reduce su capacidad estructural para resistir las cargas y se presentan fallas dentro de cierto tiempo durante el cual el ambiente reacciona con el material lo cual se puede observar en la Figura 2.31.

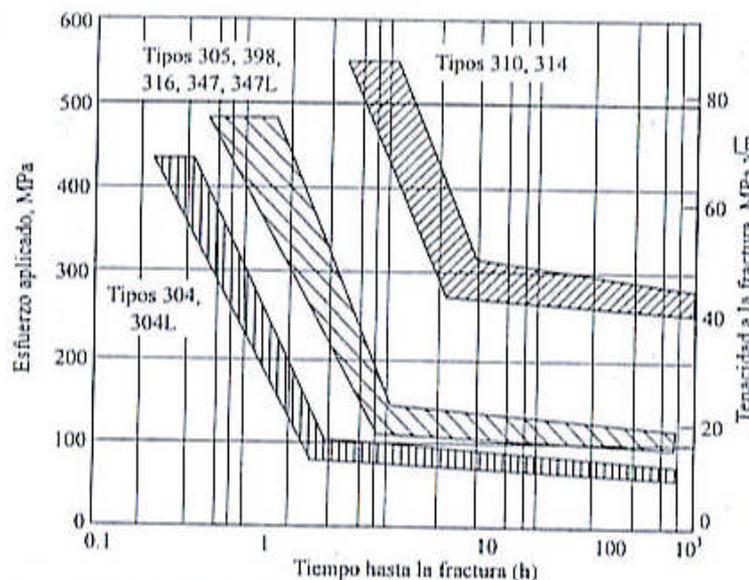


Figura 2.31 Esfuerzo aplicado en función de la vida de probetas de acero inoxidable en solución de cloruro de magnesio.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Este fenómeno es llamado también como falla demorada y su importancia es especial al seleccionar aceros para aplicaciones marinas como cascos de barcos y plataformas petroleras, para ambos casos es mejor considerar aceros de alta resistencia para ahorrar peso pero los valores de esfuerzo permisible en miembros estructurales fabricados con este tipo de aceros en ambientes salinos no están determinados por la resistencia a la cedencia sino por el valor del esfuerzo más allá del cual se presenta la fractura inducida por el ambiente, de tal manera que las resistencias a las cargas y al ambiente se deben contrapesar considerando la optimización del peso de la estructura.

2.2 ENSAYOS DE FRACTURA POR FATIGA

En el estudio de los materiales en servicio, como componentes de órganos de máquinas o estructuras, debe tenerse en cuenta que las sollicitaciones predominantes a que generalmente están sometidos no resultan estáticas ni cuasi estáticas, muy por lo contrario en la mayoría de los casos se encuentran afectados a cambios de tensiones, ya sean de tracción, compresión, flexión o torsión, que se repiten sistemáticamente y que producen la rotura del material para valores de la misma considerablemente menores que las calculadas en ensayos estáticos. Este tipo de rotura que necesariamente se produce en el tiempo, se denomina de *fatiga* aunque es común identificarla como *roturas por tensiones repetidas*, tensiones que pueden actuar individualmente o combinadas.

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE FATIGA

En general los ensayos de fatiga se clasifican por el espectro de carga- tiempo, pudiendo presentarse como:

- *Ensayos de fatiga de amplitud constante.*
- *Ensayos de fatiga de amplitud variable.*

Ensayos de fatiga de amplitud constante.

Los ensayos de amplitud constante evalúan el comportamiento a la fatiga mediante ciclos predeterminados de carga o deformación, generalmente senoidales o triangulares, de amplitud y frecuencia constantes. Son de ampliación en ensayos de bajo como de alto número de ciclos, ponderan la capacidad de *supervivencia o vida a la fatiga* por el número de ciclos hasta la rotura (inicio y propagación de la falla) y la *resistencia a la fatiga* por la amplitud de la tensión para un número de ciclos de rotura predeterminado. Es usual denominar como resistencia a la fatiga a la máxima tensión bajo la cual el material no rompe o aquella que corresponde a un número preestablecido de ciclos según los metales o aleaciones.

A esta definición la norma ASTM E399 define como *tenacidad de fatiga* a la tensión que corresponde a un número muy elevado de ciclos.

Ensayo de fatiga de amplitud variable.

En fatiga, cuando la amplitud del ciclo es variable, se evalúa el efecto del daño acumulado debido a la variación de la amplitud del esfuerzo en el tiempo. Son ensayos de alto número de ciclos con control de carga, que según el espectro de carga elegido serán más o menos representativos de las condiciones de servicio.

A los efectos de diferenciar los ciclos se adopta como positivas a las tensiones de tracción y negativas a las de compresión, fijándose para torsión un sentido arbitrario ya sea positivo o negativo.

Cualquiera que resulte el ciclo adoptado la frecuencia deberá permanecer constante y sin entrar a analizar la influencia de las propiedades mecánicas, se puede subdividir los ensayos en función de su valor en:

Baja frecuencia	$f < 5 \text{ Hz}$
Media frecuencia	$5 < f < 30 \text{ Hz}$
Alta frecuencia	$30 < f < 150 \text{ Hz}$
Muy alta frecuencia	$f > 150 \text{ Hz}$

Siendo los más utilizados los rangos de media y alta frecuencia, con el fin de disminuir los tiempos de ensayo.

2.2.2 ORIGEN DE LA ROTURA POR FATIGA EN LOS METALES

Aunque no se ha encontrado una respuesta total al fenómeno de rotura por fatiga, que se puede llamar “prematura”, cuando se somete a un metal a tensiones cíclicas o vibratorias, y son varias las teorías que tienden a ello, se puede aceptar que la fractura por fatiga se debe a deformaciones plásticas de la estructura, en forma análoga (iguales planos y direcciones cristalográficas), que en los casos vistos para deformaciones monodireccionales producidas por cargas estáticas, a diferencia que bajo tensiones repetidas en algunos cristales se generan deformaciones residuales.

Estas bandas de deslizamiento, que aparecen aún bajo pequeñas cargas, se acrecientan con los ciclos, de manera que al llegar a la saturación de los granos afectados, la distorsión de la red provocará el inicio de la fisura.

Con más precisión se puede decir que las deformaciones de fatiga se engendran preferentemente en granos próximos a la superficie del metal, separados tan solo por algunos espacios atómicos, produciendo los efectos conocidos como extrusión e intrusión. En general y por el efecto de la intrusión la tracción acelera la propagación de la grieta, en cambio la compresión la retarda.

El inicio de la rotura por fatiga puede producirse, además que por los hechos explicados, por deficiencias en el material debidas a defectos estructurales

(inclusiones, sopladuras, etc.) por discontinuidades de las superficies que provocan el efecto de forma (orificios, roscas, chaveteros, cambios de sección, maquinados incorrectos, etc.) y por el tratamiento o estado de las superficies (el endurecimiento mejora la resistencia en cambio la corrosión la disminuye considerablemente).

Independientemente de la geometría de un sólido se puede calcular el factor de intensidad de esfuerzos en función de la carga aplicada, el cual nos servirá para calcular la tenacidad a la fractura del material K_{IC} .

Para el dimensionamiento de las probetas y la obtención de K_{IC} , se lo debe hacer mediante la norma ASTM E-399. Las probetas para el ensayo se maquinan con precisión y se pulen para crear una superficie muy lisa.

El ensayo comprende una parte inicial de pre-agrietamiento por fatiga, hasta alcanzar la longitud de grieta correspondiente al dimensionamiento del material, y posteriormente se realiza un ensayo de tensión, del cual se obtiene la curva P-v (Carga-Desplazamiento de la grieta), como se muestra en la Figura 2.24.

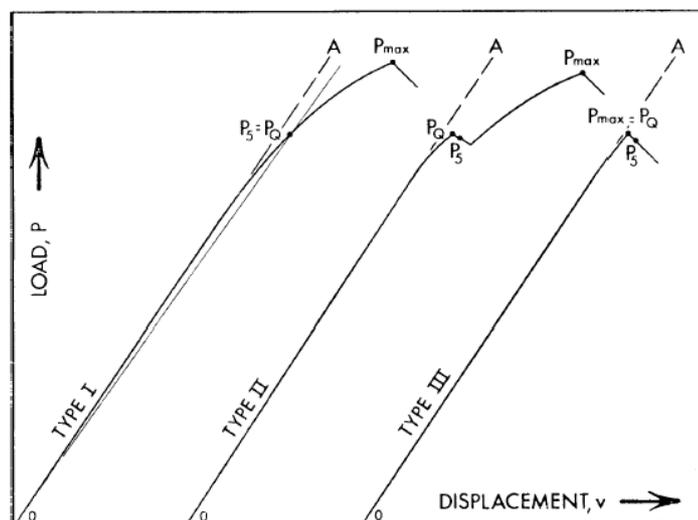


Figura 2.32 Curva Carga-Desplazamiento, para el ensayo de tenacidad a la fractura

Fuente: Norma ASTM E399

De la gráfica se obtiene una carga P_Q , la cual se sustituye en la ecuación de intensidad de esfuerzo correspondiente a la geométrica de la probeta, con la cual se obtiene un valor de intensidad de esfuerzo provisional K_Q .

El valor de K_Q se denomina como K_{IC} si los resultados del ensayo cumplen con las condiciones que la norma exige, sin embargo K_Q puede ser; sólo la intensidad de esfuerzo crítico para el espesor particular del material, en caso de no cumplir con dichas condiciones.

Este ensayo da resultados satisfactorios si es realizado en probetas de materiales frágiles y de alta resistencia, para lo cual la norma exige determinar el ancho de la probeta:

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.18)$$

Donde σ_Y es el límite elástico convencional al 0.2% medido a la misma temperatura y velocidad de carga que en el ensayo de fractura, por lo tanto se debe acudir a la experiencia o a un proceso iterativo ya que en principio se necesita el valor de K_{IC} para dimensionar la probeta. Toda medición previa que se realice se denominará K_Q mientras no se cumpla este requisito. En todo caso la norma presenta una alternativa de dimensionamiento utilizando la proporción de límite de elasticidad del módulo de Young como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Espesores recomendados para longitud de grieta

σ_{YS} / E	Mínimo Espesor de longitud de grieta recomendados	
	Pulg	Mm
0.0050 a 0.0057	3	75
0.0057 a 0.0062	2	63
0.0062 a 0.0065	2	50
0.0065 a 0.0068	1	44
0.0068 a 0.0071	1	38
0.0071 a 0.0075	1	32
0.0075 a 0.0080	1	25
0.0080 a 0.0085	¾	20
0.0085 a 0.0100	½	12.5
0.0100 o más	¼	6.5

Fuente: Norma ASTM E399

Se puede seleccionar un valor anterior de la tabla ya que cuando se ha establecido como $2.5 (K_Ic/\sigma_{YS})^2$ es sustancialmente menor que el mínimo espesor recomendado dado en la Tabla 2.2.

Los aceros estructurales tienen poca resistencia y presentan mucha deformación plástica en el extremo de la grieta, por lo cual la fractura implica deformación elástica y plástica en el extremo de la grieta, por esta razón el dimensionamiento de probetas de este tipo de materiales se lo puede realizar mediante el método de Desplazamiento de Apertura de la Grieta (COD, Crack Opening Displacement).

El método COD indica que al cargar, un material dúctil con una grieta previa afilada generada por fatiga, el frente de la grieta se enroma, provocando un crecimiento de la grieta debido al enromamiento; el se calcula a 45° como se muestra en la Figura 2.33.

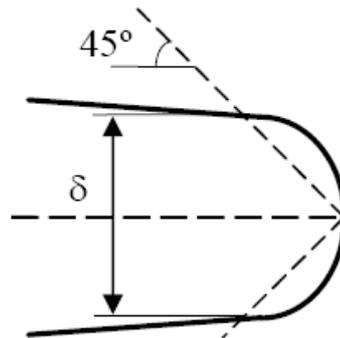


Figura 2.33 Definición del COD en fractura elastoplástica

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Donde δ es la apertura de la grieta y está definida como:

$$\delta = \alpha \cdot \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_y} \quad (2.19)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{4}{\pi} & \text{para tensión plana} \\ \frac{4 \cdot (1 - \nu^2)(1 - 2\nu)}{\pi} & \text{para deformación plana} \end{cases}$$

La norma también exige que el espesor de la probeta sea por lo menos 50 veces la apertura de la grieta:

$$B \geq 50\delta \quad (2.20)$$

Para determinar el valor de K_{IC} se deben cumplir dos condiciones:

$$\frac{P_{\max}}{P_Q} \leq 1.10; \quad (2.21)$$

Donde P_{\max} es la carga máxima que la probeta puede resistir.

$$2.5 \cdot \left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2 < B, a; \quad (2.22)$$

Donde B es el ancho de la probeta y a es la longitud de la grieta.

Si se cumplen las dos condiciones entonces K_Q es considerado como K_{IC} .

La condición teórica para que el valor de K_Q se considere como K_{IC} es que la variación ΔK_I sea como mínimo del 60% de K_{IC} ;

$$\Delta K_I \leq 0.6 \cdot K_{IC} \quad (2.23)$$

Donde ΔK_I se determina a partir de la ecuación de Paris y Erdogan luego de haber concluido el preagrietamiento por fatiga.

La norma especifica varias configuraciones de probetas y sus respectivas condiciones de ensayo, por ejemplo la Figura 2.34 muestra la configuración de una probeta compacta de tracción (CT), donde la zona plástica deberá ser pequeña en comparación con las dimensiones de la probeta, por lo tanto la longitud de la grieta a , el ligamento $w - a$ y la altura media de la probeta deberán ser menores o iguales que el espesor B .

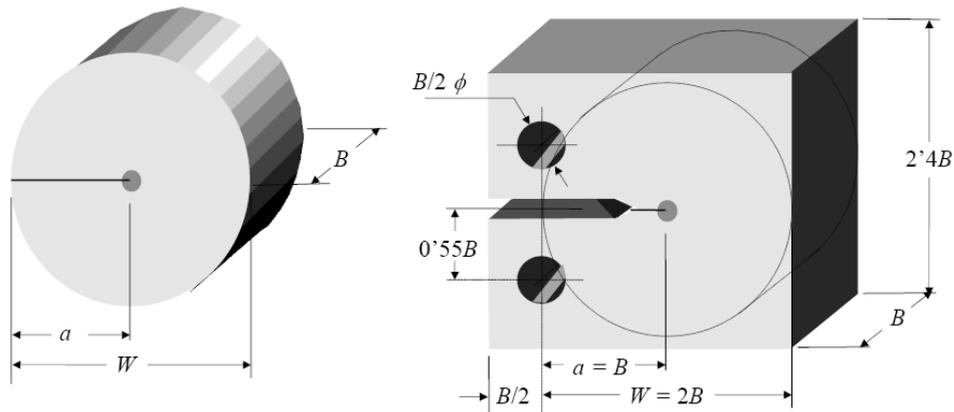


Figura 2.34 Dimensiones de la probeta compacta de tracción (CT).

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Este ensayo presenta especial atención a la grieta ya que debe ser lo más afilada posible, para lo cual el método autorizado consiste en introducir una muesca y desde esta crecer una grieta por fatiga. El tamaño de la zona plástica asociada a la punta de la grieta que crece por fatiga debe ser más pequeño que el de la zona plástica que se genere después del ensayo.

La norma también presta atención al frente de la grieta ya que este debe ser lo más recto posible para garantizar un K_I constante para todos los puntos del frente de la grieta. Por ejemplo si la probeta es muy delgada basta con una muesca recta, sin embargo se recomienda una muesca en V, de tal forma que la grieta inicie en la punta de la muesca en V y crezca a partir de ella.

Para conseguir un frente de grieta más plano y un espesor de probeta efectivo más grande se puede realizar muescas laterales como se muestra en la Figura 2.35, después de pre-agrietar la probeta el espesor efectivo por efectos de flexibilidad de la probeta es:

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (2.24)$$

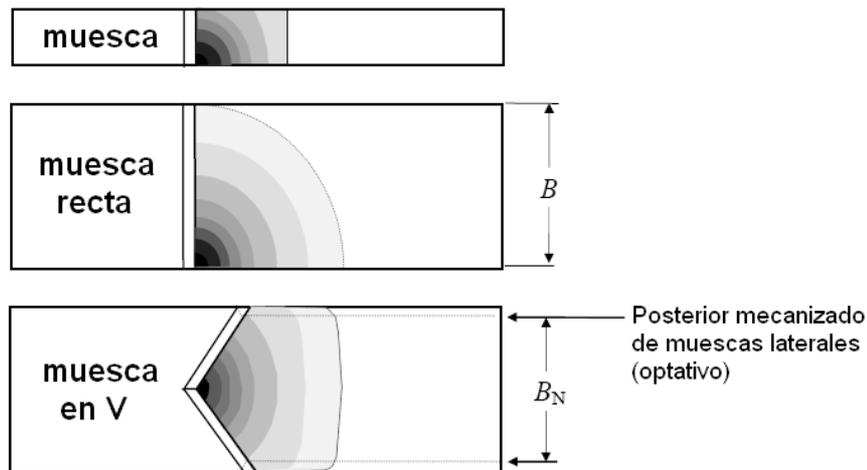


Figura 2.35 Configuración de la muesca iniciadora de la grieta.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Durante el ensayo se debe tener control de los desplazamientos y las cargas por medio del uso de extensómetros de tipo clip, ya que se deben cumplir las tolerancias que exige la norma al momento del pre-agrietamiento de la probeta.

Una vez pre-agrietada la probeta se carga hasta la fractura, una vez rota se mide la longitud de la grieta previa, a , en tres puntos diferentes del frente y se promedian. Para la probeta compacta de tracción se tiene la siguiente expresión para el factor de intensidad de esfuerzos:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B \cdot \sqrt{w}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2.25)$$

Donde

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{w} - 13.32 \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (2.26)$$

2.3 ENSAYOS METALOGRAFICOS

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones. La forma mas sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las

características microscópicas. Este examen se denomina macrográfico y de ellos se extraen datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material, es decir poder determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, partes soldadas, etc.

El microscopio es la herramienta más importante de la metalurgia tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

2.3.1 EXÁMEN MACROGRÁFICO

Generalmente estos exámenes se realizan sin preparación especial, pero a veces es necesaria la preparación de la superficie para poner en manifiesto sus características macroscópicas. En macroscopía se utilizan criterios de tipo de corte a realizar que puede ser longitudinal o transversal de los cuales se obtiene lo siguiente:

Corte transversal: naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, procesos de fabricación de caños y otros.

Corte longitudinal: proceso de fabricación de piezas, tipo y calidad de soldadura y otros.

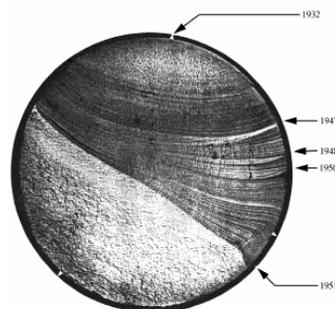


Figura 2.36 Superficie de rotura de un eje de motor, ocurrida por vibraciones de torsión.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

2.3.2 EXÁMEN MICROGRÁFICO

Es una técnica más avanzada que utiliza la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos para observar las características estructurales microscópicas, permitiendo realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal ya que ponen en evidencia la estructura cambios estructurales que sufren dicho proceso.

De modo que es posible deducir las variaciones que experimenta sus propiedades mecánicas para determinar si el metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos anteriores, tratamientos térmicos y composición general; donde se puede ver fallas metálicas y controlar procesos industriales.

Para este examen es necesario seguir los siguientes pasos:

- Corte transversal
- Montaje
- Desbaste y pulido
- Ataque químico

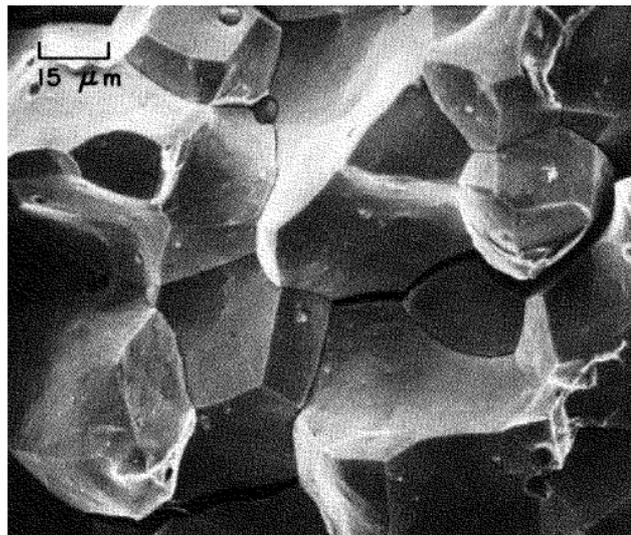


Figura 2.37 Superficie de fractura de una probeta Charpy rota a temperatura ambiente.

Fuente: FRACTURA Y TENACIDAD, Tecnun

Todo material metálico posee una estructura cristalina cuando sus átomos están ordenados de tal manera que cada uno tiene un entorno idéntico. Esta estructura cristalina es caracterizada por una celda unitaria que presenta tres vectores a , b y c que representan las direcciones de las aristas de las celdas y los ángulos α , β , y γ de las intersecciones entre los planos como se muestra en la Figura 2.38.

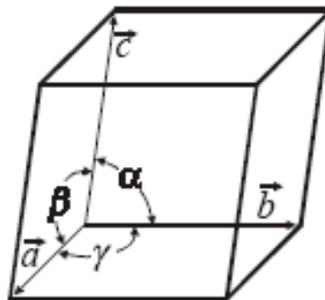


Figura 2.38 Celda unitaria de una estructura cristalina.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Según la orientación de los vectores y de los ángulos de los planos los sistemas cristalinos más comunes son:

BCC Cúbica centrada en el cuerpo $\Rightarrow a = b = c ; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

FCC Cúbica centrada en las caras $\Rightarrow a = b = c ; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

HCP Hexagonal compacta $\Rightarrow a = b \neq c ; \alpha = \beta = 90^\circ , \gamma = 120^\circ$

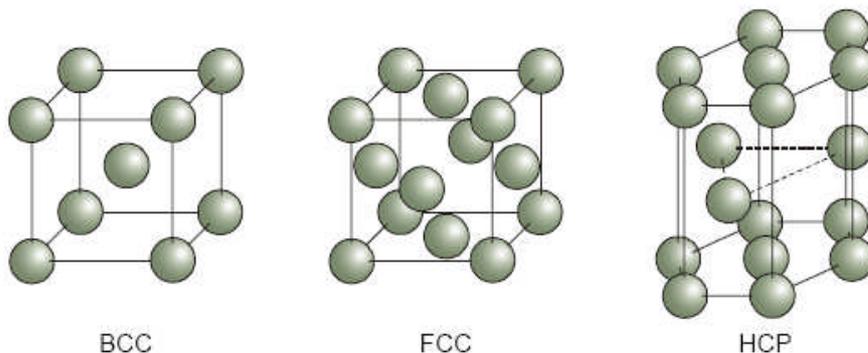


Figura 2.39 Sistemas cristalinos más comunes.

Fuente: PDF, MECÁNICA DE LA FRACTURA, Meizoso Martín & Martínez José

Existen varias estructuras de acuerdo al porcentaje de Hierro y carbono que contienen los diferentes aceros, las cuales se pueden observar en un diagrama de fases de la aleación Hierro-Carbono, que muestra en el eje vertical la temperatura y en el eje horizontal la composición química. En el extremo izquierdo se encuentra la composición 100% Fe y 0% C y en el extremo derecho se encuentra la composición 100% C y 0% Fe.

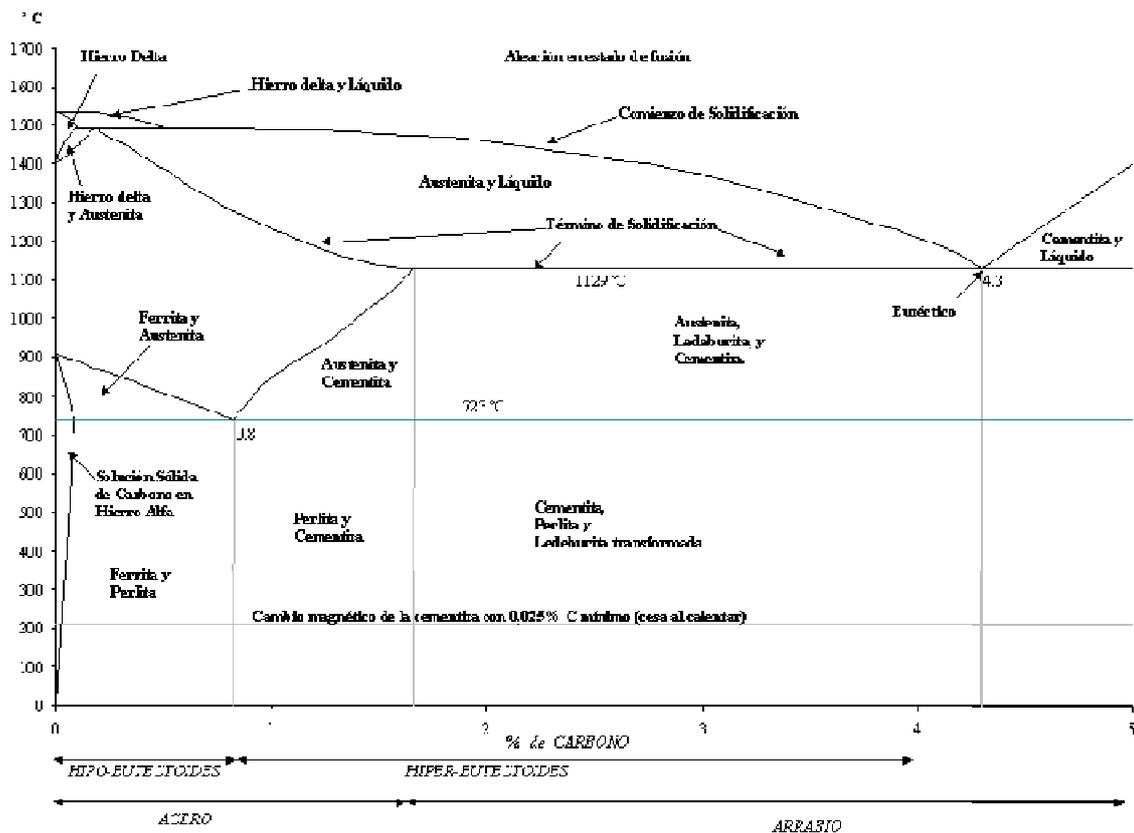


Figura 2.40 Diagrama en equilibrio de Fases de Aleación de Hierro Carbono

Fuente: LABORATORIO DE METALURGIA, ESPE

En la Figura 2.40 se muestra solamente hasta 5% C y 95% Fe por ser la zona de mayor interés ya que contiene los aceros y las fundiciones de mayor uso, así como el metal al solidificar se dispone en diversas formas. Al variar la temperatura, los cristales ganan o pierden energía y buscan una nueva ordenación tratando siempre de permanecer estables.

Los detalles de la estructura de los metales no son fácilmente visibles, pero las estructuras de grano de los metales pueden verse con un microscopio. Las características del metal, el tamaño de grano y el contenido de carbono pueden determinarse estudiando la micrografía.

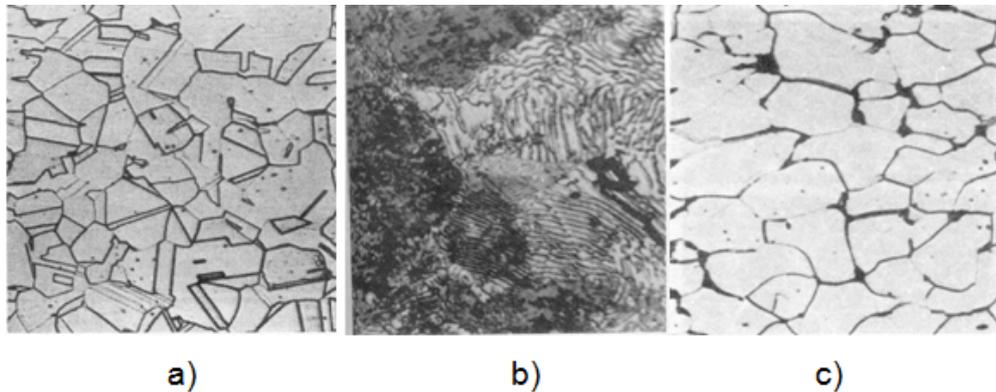


Figura 2.41 Microestructuras típicas a) Austenita b) Perlita c) Ferrita

Fuente: LABORATORIO DE METALURGÍA, ESPE

El porcentaje aproximado de carbón puede estimarse por medio de porcentaje de perlita (zonas oscuras) en los aceros al carbono recocidos. Para este propósito, se utilizan un microscopio metalúrgico y técnicas asociadas de foto microscopia. El microscopio metalúrgico de luz reflejada es similar a aquellos utilizados para otros propósitos, excepto que contiene un sistema de iluminación dentro del sistema de lentes para proveer iluminación vertical.

Algunos microscopios también tienen un retículo y una escala micrométrica para medir la imagen aumentada. Otro retículo que se utiliza contiene los diferentes tamaños de grano a aumentos de 100X y se utiliza para comparar o medir el tamaño de grano relativo. Los filtros y polarizadores se utilizan en la iluminación o el sistema óptico para reducir el brillo y mejorar la definición de las estructuras de grano. En poder de aumento del microscopio puede determinarse si se multiplica el poder de la lente objetivo por el del ocular. Por tanto, un lente objetivo de 40X con un ocular de 12.5X agrandaría la imagen hasta 500X (500 diámetros).

2.3.3 ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los métodos de ensayo no destructivos permiten la inspección de la producción al completo, manteniéndose una calidad uniforme. Pueden aplicarse en diferentes áreas, entre las que destacan:

- La defectología: detección de heterogeneidades, discontinuidades e impurezas, evaluación de los deterioros producidos por agentes ambientales y determinación de los efectos que producen los distintos tipos de tratamiento.
- La caracterización de los materiales.
- La metrología: control de las dimensiones, recubrimientos, etc.

La inspección en servicio tiene por objetivo atenuar y, en la medida de lo posible, eliminar los fallos de los materiales durante su utilización. Se trata, mediante actuaciones preventivas de inspección, de que los mecanismos o estructuras no pierdan capacidad para desempeñar la tarea para la que fueron proyectados.

Existen cuatro tipos de ensayos no destructivos y son:

- Radiología industrial
- Ensayos por ultrasonidos
- Ensayos mediante partículas magnéticas
- Ensayos por tintas penetrantes

Para elegir el método de inspección, hay que tener presente tanto la naturaleza del material como su estado superficial. Teniendo en cuenta que el aumento de sensibilidad para cada método lleva consigo el aumento del costo del ensayo, es preciso que previamente se defina el nivel de calidad o de aceptabilidad que requiera el producto.

Una característica común en los métodos de ensayos es que siguen procedimientos indirectos. Es decir, determinan la característica buscada en el producto a través de cualquier otra propiedad relacionada con ella.

La interpretación de los resultados consiste en hallar la correlación entre el resultado observado con la propia naturaleza, con la morfología, la situación o el tamaño de la heterogeneidad. La evaluación trata de hallar la correlación entre las heterogeneidades detectadas con sus correspondientes características y dimensiones, y el efecto que provoque sobre las propiedades que el material requiera en servicio.

Ensayo de tintas penetrantes

El método de ensayo por tintas penetrantes sirve para detectar discontinuidades que afloran a la superficie en sólidos no porosos, puesto que al aplicar un líquido sobre la superficie de la muestra, éste penetra en las discontinuidades por capilaridad. Una vez que se elimina el exceso de líquido de la superficie de la muestra, el líquido contenido en las discontinuidades sale al exterior con la ayuda del revelador, pudiendo observarse en su superficie. En comparación con los demás métodos, la aplicación de este ensayo es menos compleja y no requiere el empleo de equipos sofisticados.

Los factores que influyen en la realización del ensayo por tintas penetrantes son las obstrucciones mecánicas, los recubrimientos y contaminantes superficiales, la configuración geométrica de la discontinuidad, la tensión superficial del líquido penetrante, los aditivos del propio líquido, la temperatura de los distintos componentes del ensayo y la rugosidad del interior de la discontinuidad.

Este tipo de ensayo se aplica fundamentalmente a los materiales metálicos no ferromagnéticos, tales como el aluminio y sus aleaciones, los aceros inoxidables, cobres, bronces, latones, etc., y a los materiales no metálicos.

Productos utilizados

- Limpiadores: las principales características de los removedores o limpiadores es que son líquidos de baja viscosidad, solubles en detergentes y agua, no corrosivos y no depositan residuos.

El nivel de evaporación del removedor debe ser un dato considerado a la hora de escoger el producto. Por lo que existen dos tipos de removedores los de lenta evaporación y los de rápida evaporación. Un removedor de lenta evaporación permanecerá más tiempo sobre el área pudiendo remover los residuos de adentro de los poros. Cuando el limpiador es utilizado para quitar los residuos de la superficie antes de realizar el ensayo, un removedor de lenta evaporación puede interferir en la penetración del líquido y quitarle efectividad a la inspección. Los removedores de rápida evaporación tienen mejor efecto de solvencia para quitar grasa y aceites de la superficie. En lo que respecta al medioambiente, todos los removedores son inflamables y no deben ser usados en espacios confinados sin una apropiada ventilación.

- Penetrantes: las propiedades más importantes que deben cumplir los líquidos penetrantes son la capacidad para penetrar fácilmente en las discontinuidades más finas, mínima tensión superficial, velocidad de evaporación o secado adecuada, facilidad de limpieza, fluidez, conservación del color o la fluorescencia durante el tiempo necesario, químicamente inerte con respecto a la muestra, no inflamabilidad, estabilidad, toxicidad nula, baratura. Lógicamente, es imposible reunir todas estas propiedades en una sola especie química, por lo que se utilizan combinaciones de líquidos con diferentes composiciones.

Los líquidos penetrantes se agrupan en función de la fuente de luz que se precisa para la observación de las indicaciones que proporciona el ensayo. Así, pueden ser coloreados que se observan con luz visible blanca, o fluorescentes, que se observan con luz negra o ultravioleta.

- Reveladores: los reveladores actúan como papel secante que extrae el líquido de la discontinuidad y reduce el tiempo necesario para que la indicación pueda ser observada. Deben reunir características como gran

capacidad de absorción del penetrante, buena definición del contorno de las indicaciones, fácil aplicabilidad y espesor uniforme de la capa resultante, fácil eliminabilidad y no corrosividad.

Existen diversos tipos de reveladores. Los de polvo seco suelen ser de yeso o de talco. Los acuosos se caracterizan por su facilidad de aplicación, aunque exigen prestar mucha atención al mantenimiento de la suspensión. Los húmedos no acuosos son suspensiones de polvo en disolventes. Finalmente, los de película líquida son soluciones o suspensiones de resinas en un medio adecuado que se aplican por pulverización.

Técnicas de inspección

El ensayo se puede realizar bien de forma manual, con equipo portátil o en instalaciones fijas; o bien en instalaciones automatizadas. La norma ASTM E165-95 describe los procedimientos a seguir en este tipo de ensayo.

Resultados

Las formas más comunes de resultados en este tipo de ensayos son:

- Indicaciones lineales continuas, abiertas o cerradas. Son producto de la existencia de grietas, dando lugar a líneas endentadas, rugosas o con ramificaciones; de cierres de enfriamiento, en las que las líneas son rectas, suaves y estrechas; o de solapes de forjado que dan lugar a líneas sinuosas y suaves.
- Indicaciones lineales intermitentes. Son consecuencia del cierre de algunas zonas de las discontinuidades cuando las piezas se someten a procesos de rectificado, forjado o mecanizado.
- Indicaciones redondeadas. Se deben a porosidades, consecuencia de oclusiones gaseosas.
- Indicaciones puntiformes, agrupadas o dispersas. Proceden de discontinuidades originadas por burbujas ocluidas, por la naturaleza porosa de la pieza o por microrechupes en aleaciones fundidas.

Como en todos los ensayos no destructivos, en el ensayo de tintas penetrantes hay que prestar especial atención a la generación de indicaciones falsas que son producto del lavado defectuoso de las piezas, de la manipulación poco cuidadosa, de problemas derivados de la geometría y/o de la construcción de la pieza ensayada.

Ventajas del ensayo por tintas penetrantes

Entre las ventajas de este método, se pueden citar:

- Permite ensayar toda la superficie de la pieza.
- No requiere emplear equipos complejos ni caros, que abarquen gran cantidad de materiales.
- Es un ensayo económico.

Desventajas del ensayo por tintas penetrantes

Entre sus desventajas se tiene:

- No detecta discontinuidades que se encuentren bajo la superficie.
- No se puede aplicar a materiales porosos ni a piezas con recubrimientos protectores o pintadas.
- Los penetrantes son líquidos derivados del petróleo, lo que dificulta su empleo en algunos materiales plásticos.

2.4 ACEROS ESTRUCTURALES

El acero estructural es el producto de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros elementos tales como silicio, fósforo, azufre y oxígeno, que le aportan características específicas. El acero laminado en caliente, fabricado con fines estructurales, se denomina como acero estructural al carbono, con límite de fluencia de 2549 kg/cm².

Los aceros estructurales o de bajo contenido de Carbono contienen de 0.06 a 0.25% C y un 98% de Hierro y el porcentaje restante por otros materiales que le permiten mejorar su soldabilidad y resistencia a la intemperie y además no adquieren dureza sensible por un temple.

Gracias a las buenas prestaciones y abundancia de este tipo de aceros se pueden fabricar estructuras de gran tamaño como puentes de ferrocarril, estructuras de estaciones, columnas metálicas de líneas eléctricas, cascos de los buques, estructuras de edificios, carrocerías de automóviles, tubos de bicicletas, clavos, alfileres y muchos objetos que se utiliza diariamente y en la mayoría de los casos se lo utiliza tal como viene de las acerías sin dar un tratamiento térmico especial previamente. Los aceros estructurales según su forma se clasifican en: perfiles estructurales, barras y planchas.

Perfiles Estructurales

Los perfiles estructurales son piezas de acero laminado cuya sección transversal puede ser: rodada en caliente en forma de I, H, T, canal, ángulo y tubo; y rodada en frío como los perfiles tipo sombrero, canal atiesada y Z atiesada.

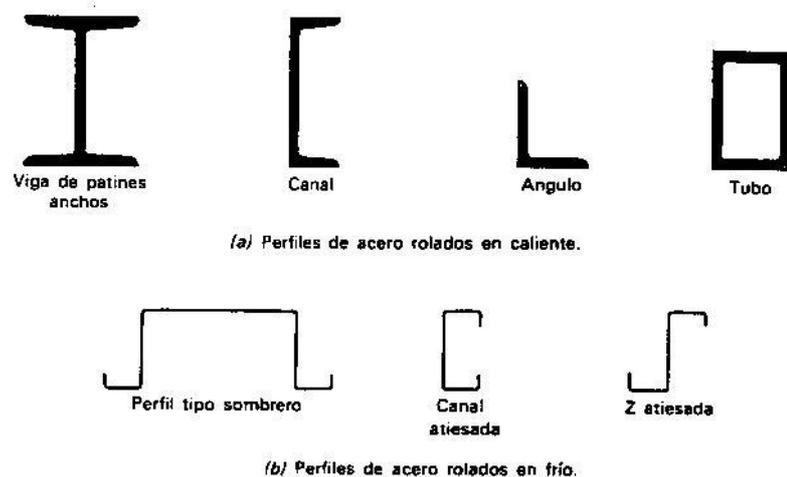


Figura 2.42 Secciones comerciales del acero estructural.

Fuente: <http://www.virtual.unal.edu.co.html>

Barras

Piezas de acero laminado, cuya sección transversal puede ser circular, cuadrada o hexagonal en todos los tamaños.

Planchas

Las planchas de acero estructural son productos planos de acero laminado en caliente con anchos de 203 mm y 219 mm, y espesores mayores de 5.8 mm y mayores de 4.5 mm, respectivamente.

Propiedades mecánicas del acero estructural

El acero estructural tiene propiedades idénticas a tensión y compresión, por ello su resistencia se la obtiene mediante ensayos con probetas pequeñas sometidas a cargas de tracción, tiene la propiedad de unirse fácilmente mediante la soldadura, pernos remaches.

La resistencia del acero puede verse afectada al ser sometido a fatiga durante un largo plazo, ya que existen grandes cambios de esfuerzos que lo puede llevar a fallar fácilmente, por esta razón se deben limitar los esfuerzos máximos. Uno de los aceros estructurales más usados y con mayor resistencia es el acero ASTM A-36, el cual tiene un límite de fluencia de 36000 psi (2530 kg/cm²). Las características estructurales del acero estructural ASTM A-36 se aprecia en la gráfica Esfuerzo vs Deformación unitaria, mostrado en la Figura 2.43.

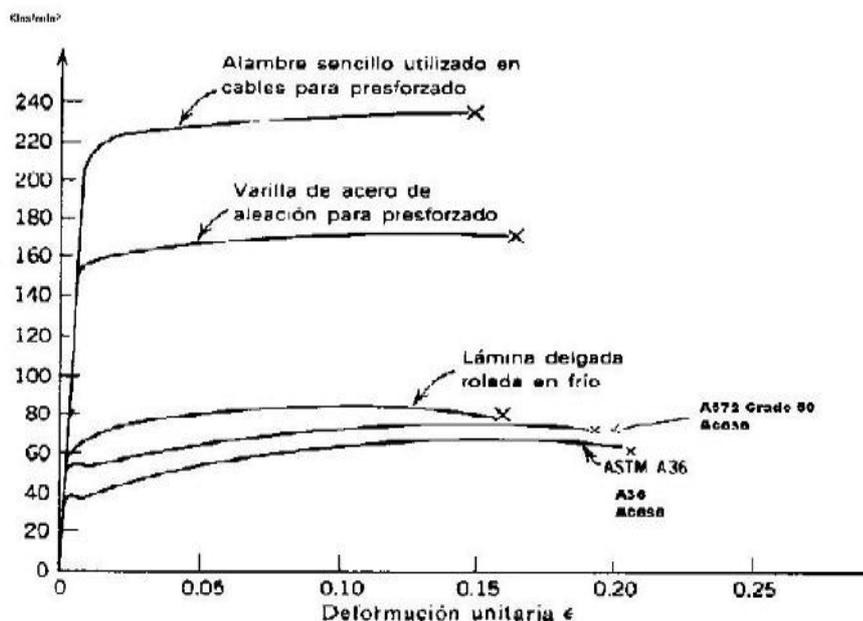


Figura 2.43 Curvas Esfuerzo vs Deformación unitaria en aceros estructurales.

Fuente: <http://www.virtual.unal.edu.co.html>

En la gráfica se pueden observar los siguientes comportamientos:

Comportamiento elástico: el cual llega hasta un esfuerzo alto, donde la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria se define por la elasticidad, cuyos parámetros básicos son el esfuerzo de fluencia (σ_y) y la deformación unitaria (ϵ_y).

Comportamiento plástico: el cual tiene una tendencia de esfuerzo constante poco superior al esfuerzo de fluencia pero aumenta continuamente la deformación unitaria.

Punto de falla o de rotura: en este punto el material falla y se rompe, la deformación unitaria al momento de la falla es de 0.2 para el acero estructural.

2.5 ACEROS GRADO MAQUINARIA

Los aceros para construcción mecánica son esencialmente aceros forjados diseñados para aplicaciones mecánicas e ingenieriles asociadas. Estos aceros requieren críticos, y a menudo rigurosos niveles de elasticidad, resistencia, ductilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga. En algunos casos, también pueden ser resistentes a temperaturas altas o bajas y otros ambientes agresivos o corrosivos.

Los aceros grado maquinaria son utilizados para fabricar partes de máquinas como árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de expansión, pasadores, chavetas, engranes, etc.

La mayor parte de estos aceros tienen un porcentaje de carbono comprendido entre 0.25 a 0.7% C, con resistencia a la tracción que va desde 55 a 90 Kg/mm².

Las aplicaciones de este tipo de aceros son el sector automotriz, aeroespacial, ferroviario, en la explotación de petróleo y gas, minería, energía eléctrica,

defensa, agricultura, química, construcción y sectores de la ingeniería y fabricación en general. En algunas ocasiones para cumplir con su función final se requiere de un tratamiento superficial de temple y revenido posterior a su maquinado y de esta forma su límite de elasticidad suele llegar a ser un 75% de la carga de rotura.